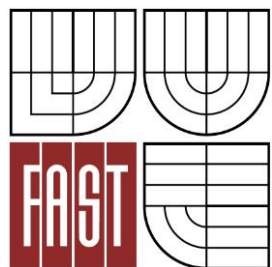




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA VYBRANÝCH SYSTÉMŮ KOLEJNICOVÝCH UPEVNĚNÍ

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF CHOSEN RAILWAY FASTENING SYSTEMS

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. VLADIMÍR TOMANDL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV SMUTNÝ, Ph.D.

BRNO 2016

Abstrakt

Důležitým aspektem při rozhodování o výběru a použití nového konstrukčního prvku je teoretická analýza (modelování) podpořená laboratorními zkouškami na hotovém výrobku. U vybraných konstrukcí železničního svršku však ani laboratorní analýza nemusí přinést průkazné výsledky. Tehdy je nezbytné doplnit validační proces výrobku o měření in-situ (v případě kolejového roštu tedy přímo na trati). Evropská legislativa v takovém případě vyžaduje dlouhodobé sledování testované konstrukce. Během této doby doporučuje průběžné sledování vybraných parametrů a následné porovnání s referenční sestavou, která byla vložena do stejné koleje a ve stejném časovém období jako sestava testovaná. Mezi dlouhodobě sledované parametry lze zařadit rozchod koleje, podélné posunutí kolejnic vůči pražcům, svěrnou sílu upevnění, stav hlavy kolejnice, pražců a komponentů upevnění a jiné. Všechny tyto parametry jsou tzv. statické. Jsou kontrolovány v době, kdy sledovaným úsekem neprojíždí žádné vozidlo. Nejvěrněji lze však parametry konstrukce definovat pomocí analýzy přímo pod dynamickým zatížením od vlakových souprav.

Disertační práce je věnována měření a analýze dynamických účinků v běžné koleji. Cílem práce je doplnění současného systému ověřování nových konstrukcí železničního svršku (zejména upevnění kolejnic) o sledování dynamických parametrů. Je navržena metodika měření a vybrán vhodný matematický aparát k hodnocení dynamických účinků kolejové dopravy.

Klíčová slova

Běžná kolej, konstrukce železničního svršku, upevnění kolejnic, měření hluku a vibrací, dynamické účinky.

Abstract

Theoretical analysis (i.e. simulation) promoted by the laboratory tests of final product is the important aspect for determination relating to choice and using the new infrastructural constituent. However, the laboratory analysis does not need to make conclusive results in some cases. At that time, it is necessary to complete the process of validation by the measurement in-situ (directly in the track section). The European legislation requires the long-term monitoring of the test constructions in this case. During this time, both the periodic monitoring of the chosen parameters and the following comparison with reference construction are recommended. The reference construction shall be inserted to the same track section and in the same time period as well as the test construction. The track gauge, the longitudinal shifts of rails vis-a-vis the sleepers, the clamping force of fastening, the rail head profile, the sleepers and the state of rail fastenings are possible to classify like the long-term monitored parameters. All these characteristics are so-called static. They are checked in time when no carriages pass through the monitored track section. However, the analysis and determination of the test construction behaviour (dynamic characteristic) are the most accurate by the moving load.

Dissertation thesis is focused on measurement and analysis of the dynamic effects at the plain line. The aim of the thesis is the completion of recent system of the new track structures verification for the dynamic parameters observe. Methodology of the measurement and convenient mathematical apparatus for analysing the dynamic effects is proposed.

Keywords

Plain line, track structure, rail fastening, noise and vibration measurement, dynamic effects.

Bibliografická citace VŠKP

Ing. Vladimír Tomandl: *Experimentální analýza vybraných systémů kolejnicových upevnění*. Brno. 2016. 240 s., 180 s. příl. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem dizertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 8. 2016

.....

podpis autora
Ing. Vladimír Tomandl

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří se svou činností podíleli na vzniku této dizertační práce. Jelikož mi pomáhala a podporovala mě velká řada kolegů a kamarádů ze školy či zaměstnání, ale také moji nejbližší v osobním životě, a rozhodně není mojí snahou někoho opominout, zůstanu ve svém poděkování raději v rovině obecné. Však každý kdo mě dobře zná a jež se v těchto řádcích morálně najde, tak ví, že jsem mu velmi zavázán.

U jedné osoby ale tento status poruším a z obecné roviny vystoupím. Zvláštní díky patří mému vedoucímu práce prof. Ing. Jaroslavu Smutnému, Ph.D., který nese zásadní podíl na zdárném dokončení tohoto díla. Svojí vstřícností, jež mnohonásobně převýšila jeho pracovní povinnosti, mi výrazně pomohl zvládnout veškerá úskalí týkající se této mezioborové a po všech stránkách velmi náročné a rozsáhlé dizertační práce. Nesmírně si vážím jeho cenných rad a všech vědomostí, které mi předal. Z celého srdce doufám a věřím, že někdy v budoucnu se naskytne příležitost, jak to panu profesorovi alespoň částečně oplatit.

„Děkuji.“

.....
podpis autora
Ing. Vladimír Tomandl

Obsah

Úvod	7
1. Současný stav řešené problematiky	9
1.1 Železniční svršek	17
1.1.1 Upevnění kolejnic	18
1.1.1.1 Historický vývoj upevnění kolejnic	18
1.1.1.2 Současnost	20
1.2 Provozní ověřování upevnění kolejnic	26
1.3 Koncepce používání systémů upevnění v České republice	28
1.4 Vybrané sestavy železničního svršku	30
2. Cíle práce.....	39
3. Dynamické a akustické děje v koleji	41
3.1 Vozidlo a kolej	41
3.1.1 Jízda vozidla v přímé	41
3.1.2 Jízda vozidla v oblouku	43
3.2 Vibrace od kolejové dopravy.....	45
3.3 Hluk od kolejové dopravy	49
3.4 Charakteristika kolejového roštu	52
3.5 Protivibrační a protihluková opatření	54
4. Metodika měření.....	59
4.1 Laboratorní měření	60
4.1.1 Zkušební místo	60
4.1.2 Uspořádání měření.....	61
4.1.3 Výběr snímačů zrychlení vibrací	62
4.1.4 Měřicí aparatura.....	64
4.1.5 Parametry měření.....	65
4.2 Měření in-situ	66
4.2.1 Měření posunů vyvolaných zatížením konstrukce	68
4.2.1.1 Uspořádání měření.....	68
4.2.1.2 Výběr snímačů dráhy.....	69
4.2.2 Měření vibrací šířících se konstrukcí do okolí trati	71

4.2.2.1 Uspořádání měření	71
4.2.2.2 Výběr snímačů zrychlení vibrací	74
4.2.2.3 Buzení rázovým kladivem in-situ	75
4.2.3 Měření hluku šířícího se do okolí trati	75
4.2.3.1 Uspořádání měření	76
4.2.3.2 Výběr snímačů akustického tlaku	77
4.2.4 Měřicí aparatura	78
4.2.5 Parametry měření	78
4.2.5.1 Zkušební místo	79
4.2.5.2 Klimatické podmínky	79
4.2.5.3 Měření teploty kolejnicových pásů	79
4.2.5.4 Měření rychlosti vlaků	80
4.2.5.5 Časový interval měření	80
4.2.5.6 Stanovení hluku pozadí	81
5. Matematický aparát.....	83
5.1 Měření technického signálu	83
5.1.1 Vzorkování signálu	83
5.1.2 Kvantování signálu (A/D převodník).....	85
5.1.3 Filtrování signálu	86
5.2 Zvolené metody zpracování	87
5.2.1 Analýza v časové oblasti.....	88
5.2.1.1 Kvantitativní hodnocení amplitud chvění	90
5.2.1.2 Ekvivalentní trvalá vážená hladina akustického tlaku $L_{pAeq,T}$	91
5.2.1.3 Ekvivalentní trvalá vážená hladina akustického tlaku za dobu průjezdu $L_{pAeq,Tp}$	92
5.2.1.4 Hladina jednorázové expozice hluku SEL	92
5.2.1.5 Hladina expozice průjezdu TEL	92
5.2.2 Analýza ve frekvenční oblasti.....	93
5.2.2.1 Fourierova transformace (FT).....	93
5.2.2.2 Diskrétní Fourierova transformace (DFT)	94
5.2.2.3 Rychlá Fourierova transformace (FFT)	94
5.2.2.4 Parsevalův zákon zachování energie.....	95
5.2.2.5 Oktávová a třetinooktávová analýza	95

5.2.2.6 Váhové filtry	96
5.2.2.7 Frekvenční odezvosá funkce FRF	96
5.2.3 Analýza v časově-frekvenční oblasti	98
5.2.3.1 Okénková Fourierova transformace STFT (Short Time Fourier Transform).....	98
5.2.3.2 Heisenbergův princip neurčitosti	99
5.2.3.3 Transformace z Cohenovy třídy	100
6. Výběr vhodného stanoviště měření	101
6.1 Lokalizace vhodného úseku měření	102
6.2 Kvalita geometrie koleje v daném úseku měření.....	102
6.3 Charakterizace dynamických vlastností úseku koleje	106
6.3.1 Drsnost kolejnice	106
6.3.2 Stupeň dynamického útlumu trati TDR.....	108
6.3.2.1 Uspořádání měření TDR.....	108
6.3.2.2 Postup měření TDR	108
6.3.2.3 Měřicí aparatura pro stanovení TDR	111
6.3.2.4 Vyhodnocení TDR.....	111
6.4 Určení konkrétního měřicího profilu	114
6.4.1 Měření kvality podepření pražce	116
6.4.1.1 Přímé měření zatlačení pražce	116
6.4.1.2 Výpočet zatlačení pražce z jiné měřené veličiny.....	118
7. Realizace a vyhodnocení měření	127
7.1 Laboratorní měření	127
7.1.1 Časová analýza	128
7.1.2 Frekvenční analýza	128
7.1.3 Shrnutí	134
7.2 Měření in-situ	136
7.2.1 Lokalita Bílovice nad Svitavou	136
7.2.1.1 Frekvenční analýza.....	137
7.2.1.2 Shrnutí	137
7.2.2 Lokality Počátky-Žirovnice, Popelín a Kamenný Malíkov.....	138
7.2.2.1 Časová analýza	146
7.2.2.1.1 Časová analýza posunů.....	146

7.2.2.1.2 Časová analýza zrychlení vibrací.....	152
7.2.2.1.3 Časová analýza akustického tlaku.....	157
7.2.2.2 Frekvenční analýza	159
7.2.2.2.1 Frekvenční analýza zrychlení vibrací	159
7.2.2.2.2 Frekvenční analýza akustického tlaku	163
7.2.2.3 Shrnutí.....	165
7.2.3 Lokality Hranice na Moravě a Napajedla	167
7.2.3.1 Časová analýza.....	170
7.2.3.1.1 Časová analýza posunů	170
7.2.3.1.2 Časová analýza zrychlení vibrací.....	172
7.2.3.1.3 Časová analýza akustického tlaku.....	174
7.2.3.2 Frekvenční analýza	175
7.2.3.2.1 Frekvenční analýza zrychlení vibrací	175
7.2.3.2.2 Frekvenční analýza akustického tlaku	179
7.2.3.3 Časově-frekvenční analýza	182
7.2.3.3.1 Časově-frekvenční analýza zrychlení vibrací	182
7.2.3.4 Shrnutí.....	184
7.2.4 Lokalita Třebovice v Čechách	185
7.2.4.1 Časová analýza.....	188
7.2.4.1.2 Časová analýza akustického tlaku.....	190
7.2.4.2 Frekvenční analýza	191
7.2.4.2.1 Frekvenční analýza zrychlení vibrací	191
7.2.4.2.2 Frekvenční analýza akustického tlaku	195
7.2.4.3 Shrnutí.....	198
7.3 Stanovení nejistot měření.....	199
7.3.1 Vyjádření nejistot měření posunů	201
7.3.2 Vyjádření nejistot měření vibrací.....	201
7.3.2 Vyjádření nejistot měření hluku.....	202
8. Doplnění a vylepšení měřicí aparatury	205
9. Závěry a doporučení.....	211
9.1 Studium dynamicko-akustických parametrů upevnění kolejnic	211
9.2 Metodika měření	216

9.3 Matematický aparát	217
9.4 Návrh zařízení na měření dynamických účinků	219
9.5 Využití získaných dat	219
9.6 Doporučení	220
Seznam použitých zdrojů	223
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	231
Seznam příloh	239

Úvod

Se zvyšující se životní úrovní lidstva dochází ke vzniku řady negativních průvodních jevů souvisejících s jeho činností. Jednou z těchto činností je také doprava, vyvolána potřebou lidstva zajistit svojí mobilitu. V posledních dvou desetiletích představuje doprava jedno z nejrychleji se rozrůstajících odvětví. V rámci světových ekonomik založených na kultu zpracování fosilních paliv však technologický rozvoj dopravy reálně neodpovídá svému potenciálu. Dopravní systém se od první velké ropné krize v 70. letech 20. století příliš nezměnil. Doprava je sice energeticky více účinná, její prudký rozvoj však nadále zhoršuje negativní účinky dopravy na životní prostředí. Mezi ty základní lze zařadit zvýšenou prašnost v okolí dopravních tepen, emise zdraví škodlivých plynů a tuhých látek vznikajících spalováním fosilních paliv a v neposlední řadě také vznik nadměrného hluku a vibrací.

Evropa si uvědomuje, že současný vývoj dopravy je ze strategického a ekologického hlediska dlouhodobě neudržitelný. Referenční scénáře [1] poukazují na to, že při zachování současného trendu by v roce 2050 dosahovala energetická závislost dopravy na ropě stále téměř 90 % a zdroje obnovitelné energie by pouze nepatrně převyšovaly cíle stanovené pro rok 2020. Emise skleníkových plynů by se o třetinu navýšily oproti stavu v roce 1990. Náklady vyvolané přetíženou dopravou by vzrostly o polovinu vůči současnosti a rozdíly v přístupnosti mezi centrálními a okrajovými oblastmi by se i nadále prohlubovaly. Řešením problému není omezení mobility, ale postupný rozvoj a preference technologií přátelských k životnímu prostředí. Z tohoto důvodu začalo evropské společenství ve svých dlouhodobých plánech globálně upřednostňovat ekologičtější druhy dopravy, jakými jsou doprava vodní či doprava kolejová.

Jak již bylo zmíněno výše, doprava patří k významnému činiteli hluku a vibrací. Ten není v zásadě vázaný na pevné místo. Hluk a vibrace způsobené dopravou patří k nepříjemným formám ovlivňování kvality životního prostředí. Dlouhodobé působení nadměrného hluku na obyvatele žijící anebo pracující v blízkosti dopravní infrastruktury bývá příčinou řady nejrůznějších onemocnění sluchového ústrojí či nervové soustavy. Šířící se vibrace zase mohou rušivě působit na lidskou duševní činnost a také mohou mít nežádoucí vliv na funkci a trvanlivost zařízení a staveb podél trasy. Zdraví škodlivému hluku je v České republice vystaveno 2,8 % obyvatel celodenně a 3,3 % obyvatel v noci. V aglomeracích nad 100 tisíc obyvatel jsou tato čísla v průměru dvojnásobná. Kolejová doprava má v tomto ohledu spíše marginální význam. Výrazněji postihuje zejména velké aglomerace Prahu a Brno, ale také vybraná průmyslová centra v severních Čechách [2]. Navzdory těmto skutečnostem se hluk z kolejové dopravy dostává stále častěji do popředí zájmu veřejnosti. Hluková problematika ovlivňuje většinu stavebních řízení. V některých případech může způsobit prodlevy v harmonogramu rekonstrukčních prací nebo omezit výkonové parametry modernizované dráhy.

Nepříznivý vliv kolejové dopravy je nejvíce hmatatelný v blízkosti hlavních železničních tahů a podél tramvajových tratí. Velikost a způsob zatížení vibračními a akustickými jevy přímo závisí na rychlosti, druhu, počtu a způsobu jízdy dopravních prostředků, směrovém a výškovém uspořádání trati, přilehlých terénních podmínkách

a v neposlední řadě také na konstrukci, stavu a údržbě kolejového svršku, spodku a kolejových vozidel.

Všeobecná tendence zvyšování únosnosti železničního svršku (betonové pražce, pevná jízdní dráha apod.) je na jedné straně nutnou podmínkou provozování koridorových a ostatních hlavních tratí Správy železniční dopravní cesty, státní organizace rychlostmi $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a více, na druhé straně však také zdrojem zvýšených dynamických interakčních sil kolo – kolejnice. Při nezajištění optimálních pružných a tlumících vazeb mezi kolejnicí a podporou je nepříznivě ovlivňováno nejen kolejové vozidlo, ale též konstrukce železničního svršku a spodku a geometrické parametry koleje. Tyto aspekty pak mívají za následek nárůst nákladů na údržbu infrastruktury a vozidel. Vibrace vzniklé na kontaktu kolo kolejnice zachycuje a tlumí kolejový rošt, tzv. primární vypružení. Sekundární vypružení představuje v konstrukci tratě kolejové lože, příp. podkladní vrstvy speciálních konstrukcí dráhy. Sekundárně jsou tlumeny zejména nižší frekvence.

Důležitou charakteristikou konstrukce železniční trati je tedy tuhost. Nedostatečná tuhost může vést k únavovým problémům jednotlivých komponentů trati, zatímco příliš vysoká tuhost vyvolává zvýšenou emisi hluku a nadměrné opotřebení kolejnic a dvojkolí železničních vozidel. Je proto snaha o nalezení adekvátního řešení, kde by byly tyto negativní vlivy co možná nejvíce potlačeny.

Dizertační práce se věnuje studiu a vymezení dynamicko-akustických parametrů vybraných konstrukcí upevnění kolejnic používaných pro běžnou kolej v České republice. Cíle práce jsou podrobně definovány v kapitole 2.

1. Současný stav řešené problematiky

Železniční doprava prošla od svého vzniku velkým vývojem. Neustále se zvětšující nároky na traťovou rychlost, resp. na nápravové zatížení vedly ke snaze o zvyšování únosnosti železničních konstrukcí. S tím je úzce spjat také požadavek na větší tuhost konstrukčních vrstev železničního spodku a zemní pláně. Plošné rozšíření bezstykové koleje a nedostatek kvalitního dřeva navíc způsobily, že betonové pražce v průběhu několika posledních desetiletí prakticky nahradily dříve používané pražce dřevěné. Betonové pražce mají mnohem větší ohybovou tuhost a menší pružnost. Tyto aspekty přispívají k většímu namáhání kolejového lože, které se od počátků železnice principiálně téměř nezměnilo.

Pražce se podbíjejí štěrkem zejména v oblastech úložných ploch. Po určitou dobu od podbití zaujímají zrna štěrku vzpřímenou polohu. Jejich vzájemné zaklínění pak přispívá k optimálním pružně tlumícím vlastnostem kolejového lože. Opakovaným zatěžováním betonového pražce dochází k postupné distribuci zrn kolejového lože do polohy ležmo. Tento jev bývá také často doprovázen obrušováním zrn štěrku a s ním spojeným zanášením kolejového lože nežádoucím jemnozrnným materiálem. Kolejové lože tak částečně ztrácí své pružně-tlumící vazby. Oblast uložení pražce se postupně přesouvá od jeho okrajů směrem ke středu. Při průjezdu vlaku je pak ložná plocha pražce dotlačována na lavičku kolejového lože a mezi pražcem a lavičkou vznikají volné prostory. Tento jev bývá doprovázen zvýšenými dynamickými účinky působícími na celou konstrukci koleje, což vede ke zpětnému urychlení celého procesu.

Aby se těmito nežádoucím dějům co nejvíce zamezilo, jsou požadovány zvýšené nároky na použité materiály (obecné technické podmínky a technické podmínky dodací), resp. na kvalitu prováděných prací (technické kvalitativní podmínky). V průběhu životnosti konstrukce jsou vkládány nemalé finanční prostředky do diagnostiky kvality koleje a její případné údržby. Mezi zásadní kvalitativní ukazatele pak patří kvalita geometrie koleje. Kvalita geometrie běžné koleje je obecně řešena evropskými i vnitrostátními pravidly. V České republice jsou četnost provádění kontrol, stavební, provozní a mezní provozní odchylky geometrických parametrů koleje resp. stavební a provozní odchylky prostorové polohy koleje uvedeny v několika dokumentech, zejména pak ve stavebním a technickém řádu drah [3] a v normě ČSN 73 6360-2 [4]. Vybranou síť celostátních drah je Česká republika zavázána udržovat tak, aby byla interoperabilní vůči drahám ostatních států v evropském železničním systému [5].

Výše uvedené skutečnosti mj. vedou k neustálé snaze o zdokonalování konstrukcí železničního svršku a uzpůsobení jejich vlastností s ohledem na podmínky, v nichž mají být použity. Proces vývoje a zkoušení každého takového výrobku lze pro účely dizertační práce rozčlenit do následujících etap:

- konstrukční návrh výrobku;
- teoretická analýza (modelování);
- laboratorní zkoušení (zkouška typu, kontrolní výrobní zkouška);
- provozní ověřování.

Jednotlivé etapy vývoje a zkoušení výrobku jsou navzájem provázány. Na základě zjištění z teoretického modelu vytvořeného dle konstrukčního návrhu může dojít ke zpětné úpravě tohoto návrhu. Výsledky laboratorních zkoušek nebo provozního ověření mohou přispět ke zpřesnění matematického modelu, apod. Požadavky na vlastnosti konstrukce stanovují evropská a vnitrostátní pravidla, příp. pak požadavky koncového uživatele. Pro systémy upevnění kolejnic lze uvést normy řady ČSN EN 13481 [6]. Pro účely této řady je v části 1 definována tzv. kategorie systémů upevnění. Kategorii systémů upevnění se rozumí typické druhy systémů upevnění ve vztahu k rychlosti, nápravovému zatížení vozidel v koleji, pro které jsou navrženy, a použitému kolejnicovému profilu. Norma rozlišuje pět kategorií systémů upevnění, viz tab. 1-1.

Charakteristika použití systému upevnění	Označení kategorie systému upevnění
Systém upevnění navržený pro lehkou městskou kolejovou dopravu a vybrané průmyslové dráhy, s typickým zatížením na nápravu 100 kN, typickým poloměrem směrového oblouku 80 m, typickou maximální rychlostí 100 km·h ⁻¹ , typickým profilem kolejnice 40 E1 a typickým rozdělením pražců nebo podpor 800 mm;	A
Systém upevnění navržený pro lehkou městskou kolejovou dopravu a vybrané průmyslové dráhy, s typickým zatížením na nápravu 160 kN, typickým poloměrem směrového oblouku 100 m, typickou maximální rychlostí 140 km·h ⁻¹ , typickým profilem kolejnice 54 E1 a typickým rozdělením pražců nebo podpor 600 mm;	B
Systém upevnění navržený pro hlavní tratě konvenčních železničních drah, s typickým zatížením na nápravu 225 kN, typickým poloměrem směrového oblouku 400 m, typickou maximální rychlostí 250 km·h ⁻¹ , typickým profilem kolejnice 60 E1 a typickým rozdělením pražců nebo podpor 600 mm;	C
Systém upevnění navržený pro tratě s velkými poloměry oblouků, často využívanými pro provoz vysokorychlostních vlaků s typickým zatížením na nápravu 180 kN, typickým poloměrem směrového oblouku 800 m, typickým profilem kolejnice 60 E1, typickým rozdělením pražců nebo podpor 600 mm a jakoukoliv typickou maximální rychlostí;	D
Systém upevnění navržený pro tratě se smíšenou dopravou obsahující těžké nákladní vlaky, s typickým zatížením na nápravu 300 kN, typickým poloměrem směrového oblouku 150 m, typickou maximální rychlostí 200 km·h ⁻¹ , typickým profilem kolejnice 60 E1 a typickým rozdělením pražců nebo podpor 600 mm;	E

Tab. 1-1 Zatržďení systémů upevnění kolejnic dle ČSN EN 13481-1; zdroj: autor

Požadavky zbylých částí normové řady se od sebe liší v závislosti na použitém materiálu a typu kolejnicové podpory pro uvažované upevnění kolejnic, či v závislosti na tom,

zda předmětná konstrukce upevnění bude vložena do kolejových spojení a rozvětvení nebo do běžné koleje. Obecně se však všechny požadavky týkají následujících kritérií:

- odpor proti podélnému posunutí kolejnice;
- odpor proti pootočení (mimo pevnou jízdní dráhu, dále jen PJD);
- útlum rázového zatížení (pouze pro příčné a výhybkové betonové pražce);
- tuhost podložky a sestavy upevnění;
- účinek opakovaného zatěžování;
- elektrický odpor systému upevnění a pražce (mimo dřevěné pražce);
- vliv působení nepříznivých vnějších podmínek;
- rozměry;
- vliv tolerancí systému upevnění na rozchod koleje;
- svěrná síla (mimo PJD);
- zabudované a vlepené součásti upevnění (pouze pro betonové pražce a pro PJD);
- provozní ověřování;
- útlum hluku a vibrací.

Normová řada ČSN EN 13481 je obdobně jako ostatní harmonizované evropské normy pro železniční aplikace založena na koncepci výkonu. Jsou v ní tedy definovány pouze funkční požadavky na systémy upevnění kolejnic, nikoli požadavky na jakost materiálu apod. Ty jsou pak předmětem jiných obecných norem. Požadavky týkající se postupů montáže, údržby nebo manipulace, stejně tak jako vliv systému upevnění na dlouhodobé chování železničního svršku nemohou být stanoveny na celoevropské úrovni. Tyto požadavky musí určit každá železniční správa individuálně, s ohledem na provozní zatížení, maximální třídu zatížení, traťovou rychlost či použitou koncepci údržby.

Důležitým aspektem při rozhodování o výběru a použití nového konstrukčního prvku je teoretická analýza. Účinky kolejových vozidel na konstrukci tratě se řeší jako interakční účinky dvou mechanických soustav – pohybujícího se kolejového vozidla a konstrukce tratě. Všeobecně jde o řešení složité dynamické úlohy, ve které konstrukce tratě vystupuje jako mechanická soustava tvořená kolejovým roštem a pražcovým podložím. Tato konstrukce je typickou prostorovou 3D soustavou modelovanou zpravidla jako jednodušší rovinná 2D soustava. Zjednodušené řešení totiž obvykle poskytuje přijatelné výsledky [7].

Běžná kolej se skládá z několika prvků, které mají různou schopnost deformace. V místě kontaktu kola vozidla s kolejnicí se přenáší síly mezi vozidlem a železniční tratí. Jedná se o složité dynamické síly obecného charakteru. Tyto interakční síly zahrnují zejména tíhové a setrvačné účinky vozidla, odstředivé síly, podélné síly způsobené změnou rychlosti pojezdu apod. Na jejich velikost mají vliv nerovnosti kolejnic i kol a další poruchy tratě. V místě kontaktu neplatí lineární vztah mezi interakční silou F [kN] a deformací. Tento vztah závisí na geometrii kontaktní plochy a lze jej vyjádřit tuhostí Hertzovy pružiny jako funkce stlačení y [m] na kontaktu kolo – kolejnice [8]:

$$F = c_H \cdot y^{\frac{3}{2}}, \quad (1-1)$$

kde konstanta c_H [$\text{N} \cdot \text{m}^{-3/2}$] závisí na materiálových vlastnostech a zaoblení kontaktních ploch. Většina interakčních úloh kolo – kolejnice však vychází z předpokladů lineární závislosti

všech proměnných. Lineární tuhost Hertzovy pružiny k_H lze vyjádřit prostřednictvím vztahu mezi přírůstkem síly dF a přírůstkem deformace dy :

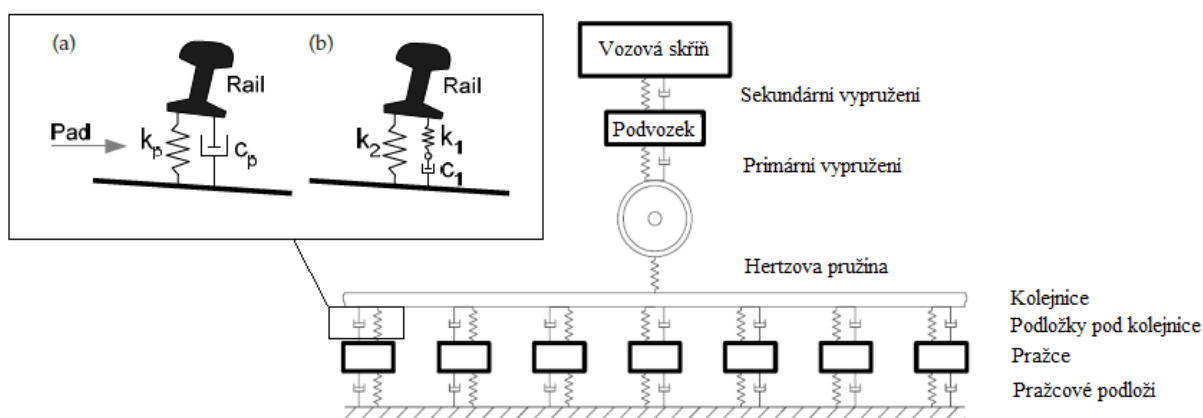
$$k_H = \frac{dF}{dy} = \frac{3}{2} \sqrt{c_H^2 \cdot F} . \quad (1-2)$$

Bude-li zjednodušeně uvažován nekonečně velký poloměr jízdního profilu kola, pak lze tuhost Hertzovy pružiny vyjádřit z rovnice (1-2) následovně:

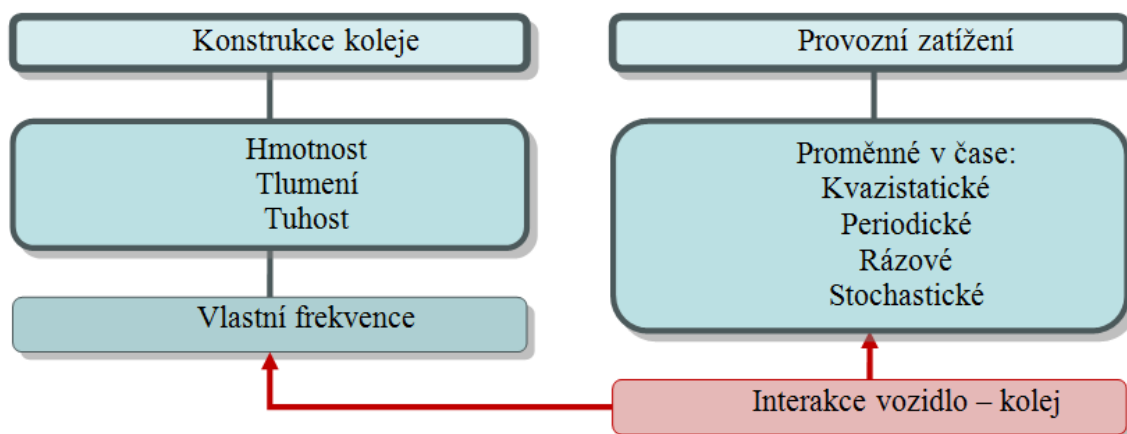
$$k_H = \sqrt[3]{\frac{3E^2 \cdot Q \sqrt{R_w \cdot R_r}}{2 \cdot (1 - \nu^2)^2}} , \quad (1-3)$$

kde E je modul pružnosti uvažovaný hodnotou $2,1 \cdot 10^{11}$ Pa, ν je Poissonův součinitel udaný číslem 0,25, Q je kolová síla [kN], R_w je poloměr kola [m] a R_r profil hlavy kolejnice [m].

Kolejnice a pražce jsou charakterizovány ohybovou tuhostí. Podložky pod patu kolejnice jsou modelovány užitím soustavy pružin a tlumičů. Začínají se uplatňovat modely s přidanou pružinou do mechanismu tlumiče. Tyto modely dokáží lépe zohledňovat proměnné vlastnosti podložek v čase a v závislosti na frekvenčním působení zátěže. Kolejové lože a podloží je obvykle modelováno podle Winklerovy hypotézy. Rozlišujeme mezi základními modely statických (např. nekonečný prut na pružném podkladu, dvouprutový model s kontinuálním pružným uložením a tlumením, Pasternakův model apod.) a dynamických výpočtů (příklad viz níže). I nejjednodušší modely pak zahrnují jak model koleje, tak i model kolejového vozidla, viz obr. 1-1. V teoretických řešeních úloh mechaniky tratě má mimořádný význam koncepce přenosové funkce, protože představuje efektivní charakteristiky pseudolineární soustavy, které se využívají i při všeobecném buzení, resp. při stochastické analýze konstrukce tratě nebo interakční soustavy kolejové vozidlo – trať. Frekvenční odezvová funkce FRF je určena hmotností, tlumením a tuhostí. Tyto parametry určují vlastní frekvence. Pokud se v zatížení vyskytne složka s touto frekvencí, projevuje se vysokými dynamickými účinky.

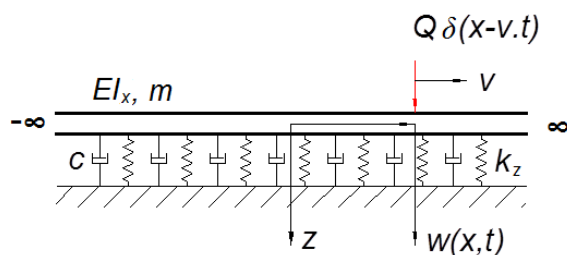


Obr. 1-1 Model dynamické soustavy vozidlo – kolej; a) model podložky s viskózním tlumením; b) model podložky zohledňující čas a frekvenční působení zátěže; zdroj: [8, 25]



Obr. 1-2 Základní principy dynamické soustavy; zdroj: [8]

Teoretickými pracemi bylo prokázáno, že pohyb zatížení má vliv na dynamickou odezvu soustavy kolo – kolejnice. Nejjednodušší dynamický model koleje s pohyblivým zatížením je znázorněn na obr. 1-3. V modelu se předpokládá, že kolová síla Q [N] se pohybuje rychlostí v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. Analýzu souvisle pružně podepřené koleje se zanedbáním tlumení popsal prof. Timošenko [9], teprve později tlumení zohlednil prof. Ing. Ladislav Frýba, DrSc., dr.h.c. [10].



Obr. 1-3 Prutový model s pohyblivým zatížením; zdroj: [8]

Diferenciální rovnice popisující tento problém je sestavena pro svislý průhyb $w(x,t)$ jako funkce staničení a času:

$$EI_x \cdot \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + m \cdot \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + c \cdot \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} k_z \cdot w(x,t) = 0, \quad (1-4)$$

kde k_z je spojitá svislá tuhost kolejové jízdní dráhy [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$], c je tlumení [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$], m je hmotnost koleje [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$] a EI_x představuje ohybovou tuhost kolejnice. Pohyblivé zatížení $Q\delta(x-v\cdot t)$ je do modelu zahrnuto později v rámci vyjádření okrajových podmínek.

Pro řešení je zavedena bezrozměrná veličina ξ_d , která představuje pohybující se proměnou:

$$\xi_d = \lambda \cdot (x - v \cdot t), \quad (1-5)$$

kde je λ převrácenou hodnotou charakteristické délky kolejového roštu L [m]:

$$\lambda = \frac{1}{L} = \sqrt[4]{\frac{k_z}{4EI_x}}. \quad (1-6)$$

Dále je možné vyjádřit poměr ke kritické rychlosti α , resp. poměr ke kritickému tlumení β :

$$\alpha = \frac{v}{v_{krit}} = \frac{v}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{m}{EI_x}}, \quad (1-7)$$

$$\beta = \frac{c}{2m} \cdot \sqrt{\frac{m}{k_z}} \quad (1-8)$$

a po substituci $w = e^{\gamma \xi_d}$ do rovnice (1-4) získat algebraickou rovnici:

$$\gamma^4 + 4\alpha^2 \gamma^2 - 8\alpha\beta\gamma + 4 = 0. \quad (1-9)$$

Čtyři kořeny rovnice (1-9) jsou v obecném případě komplexní čísla. Přitom všechny kořeny jsou významné, protože dynamické řešení není na rozdíl od statického symetrické. Vzhledem k tomu, že je nutné splnit podmínku $w(\pm\infty) = 0$, je řešením původní diferenciální rovnice (1-4):

$$\xi_d \geq 0; w = A_1 e^{\gamma_1 \xi_d} + A_2 e^{\gamma_2 \xi_d} \quad (\text{kořeny } \gamma_1 \text{ a } \gamma_2 \text{ mají zápornou reálnou část}), \quad (1-10)$$

$$\xi_d < 0; w = A_3 e^{\gamma_3 \xi_d} + A_4 e^{\gamma_4 \xi_d} \quad (\text{kořeny } \gamma_3 \text{ a } \gamma_4 \text{ mají kladnou reálnou část}). \quad (1-11)$$

Řešením konstant A_1 až A_4 z okrajových podmínek je možné získat charakteristické tvary vln pro relativní souřadnici ξ_d . Okrajové podmínky vycházejí ze spojitosti průhybové křivky včetně prvních dvou derivací a ze spojitosti průběhu posouvající síly:

$$\begin{aligned} w_l = w_p &\Rightarrow A_3 + A_4 = A_1 + A_2 \\ \frac{dw_l}{d\xi_d} = \frac{dw_p}{d\xi_d} &\Rightarrow A_3 \cdot \gamma_3 + A_4 \cdot \gamma_4 = A_1 \cdot \gamma_1 + A_2 \cdot \gamma_2 \\ M_l = M_p &\Rightarrow A_3 \cdot \gamma_3^2 + A_4 \cdot \gamma_4^2 = A_1 \cdot \gamma_1^2 + A_2 \cdot \gamma_2^2 \\ Q + T_r = T_l &\Rightarrow \frac{Q}{EI_x \cdot \lambda^3} + A_3 \cdot \gamma_3^3 + A_4 \cdot \gamma_4^3 = A_1 \cdot \gamma_1^3 + A_2 \cdot \gamma_2^3 \end{aligned} \quad (1-12)$$

Odpovídající matice rovnic pak nabývá tvar:

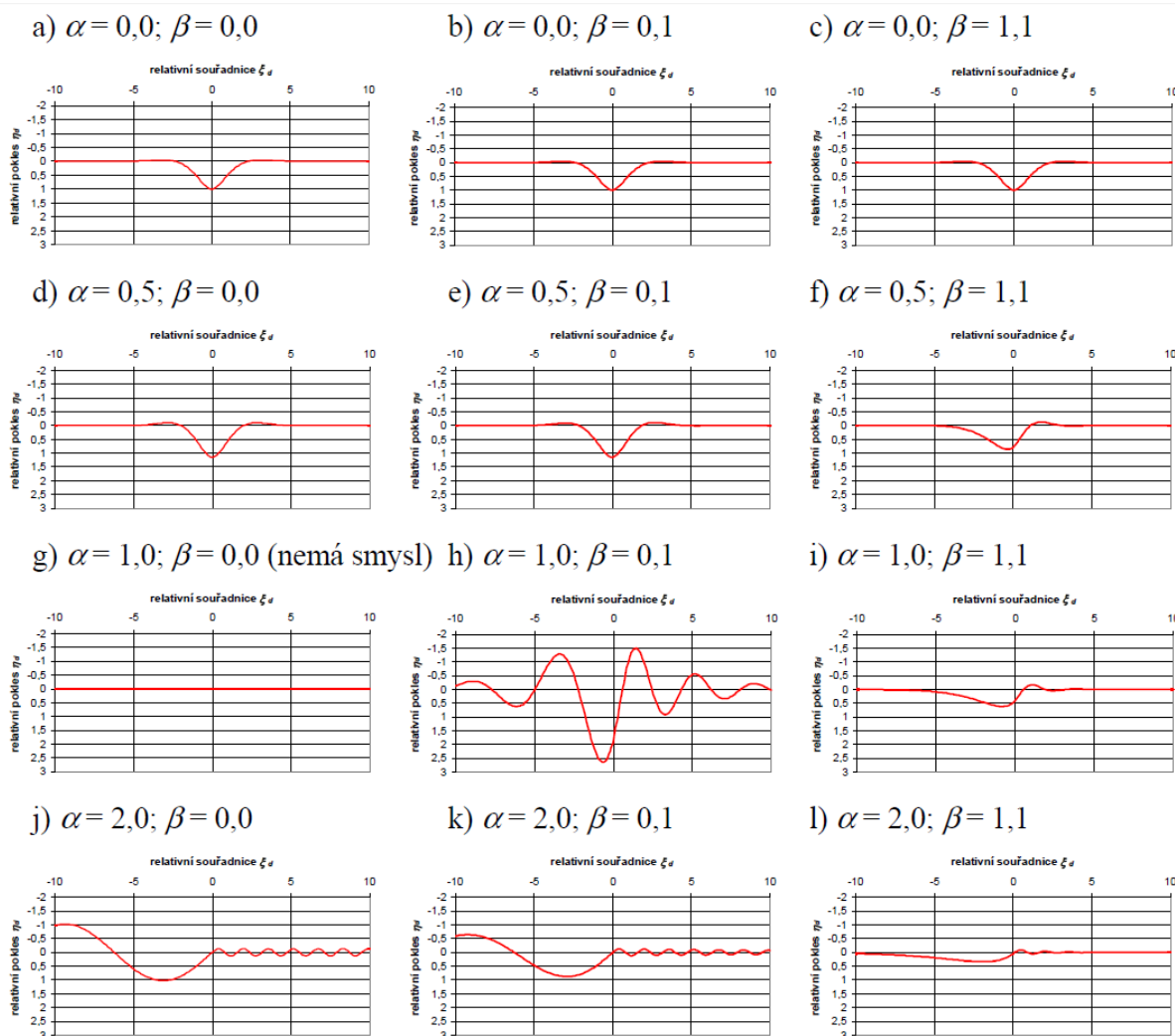
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & -\gamma_3 & -\gamma_4 \\ \gamma_1^2 & \gamma_2^2 & -\gamma_3^2 & \gamma_4^2 \\ \gamma_1^3 & \gamma_2^3 & -\gamma_3^3 & -\gamma_4^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = w_0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 8 \end{bmatrix} \quad (1-13)$$

kde w_0 je statická hodnota průhybu pod působící silou:

$$w_0 = \frac{Q}{8EI_x \cdot \lambda^3} = \frac{Q}{2 \cdot k_z \cdot L}. \quad (1-14)$$

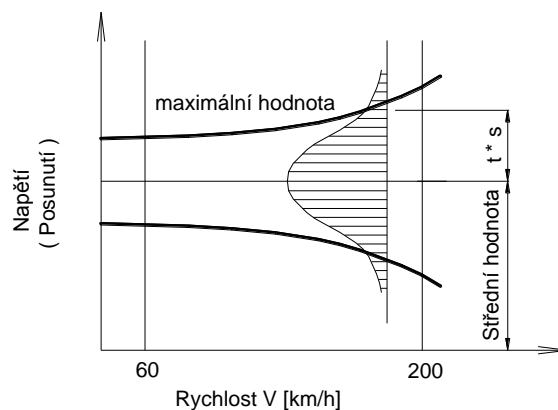
Pokud se vydělí pravé strany soustavy rovnic pro konstanty A_i statickou hodnotou průhybu w_0 , získají se relativní průhyby $\eta_d(\xi_d)$. Obr. 1-4 znázorňuje bezrozměrné veličiny η_d a ξ_d pro různé hodnoty součinitelů α a β . Pokud je $\alpha = 0$, jedná se o statický případ.

Hodnota $\beta = 0$ představuje konstrukci koleje bez tlumení. V běžných případech je kritická rychlost vyšší jak 400 m.s^{-1} , tj. pro běžné provozní rychlosti vlaků je koeficient α v rozmezí 0 až 0,3. Pro extrémně špatné podloží může být výjimečně vyšší. Poměr ke kritickému tlumení β je zpravidla větší jak 1,0 [11].



Obr. 1-4 Tvary vln v závislosti na poměru ke kritické rychlosti a poměru tlumení; zdroj: [11]

Dynamické namáhání je možné zohlednit pomocí dynamického součinitele také ve statických přístupech. Byla odvozena řada vztahů, které jsou přibližnými aproximacemi reálného dynamického zatížení. Zpravidla dostatečně nezahrnují vliv kvality geometrie koleje ani mechanické vlastnosti trati a kolejových vozidel [12]. Jeden z takových vztahů odvodil prof. Eisenmann [13] a je používán mnohými evropskými železničními správami. Z hlediska pozorování dynamických účinků měřeními v koleji bylo zjištěno, že náhodná veličina pro hodnoty napětí má normální rozložení, že střední hodnota napětí nezávisí na rychlosti vlaku a že směrodatná odchylka závisí na rychlosti vlaku, viz obr. 1-5. Podle Eisenmannovy teorie závisí dynamický součinitel γ [-] na rychlosti vlaku, kvalitě geometrických parametrů koleje a na velikosti uvažovaného intervalu vyjádřeného součinitelem t .



Obr. 1-5 Normální rozložení pro hodnoty napětí od ohybového namáhání v patě kolejnice;
zdroj: [11]

Podle standardu správce dráhy v České republice je možné při uvažování $t = 2$ vyjádřit hodnotu dynamického součinitele γ pomocí vztahu [14]:

$$\gamma = 1 + 2 \cdot k \cdot \varphi, \quad (1-15)$$

kde k značí součinitel vyjadřující kvalitu pražcového podloží [-] a pohybuje se v hodnotách $0,1 \div 0,3$. φ vyjadřuje vliv rychlosti jízdy [-] a pohybuje se v hodnotách $1,0 \div 1,3$.

Teoretická analýza konstrukčních prvků železničního svršku bývá současně podpořena laboratorními zkouškami na hotovém výrobku [15]. U vybraných konstrukcí železničního svršku však ani laboratorní analýza nemusí přinést průkazné výsledky. Tehdy je vhodné na přání uživatele doplnit validační proces výrobku o měření in situ (v případě kolejového roštu tedy přímo na trati).

1.1 Železniční svršek

Železniční svršek je jednou ze základních částí železniční dopravní cesty. Tvoří jízdní dráhu, která nese a vede kolejová vozidla. Skládá se ze základní konstrukce tvořené kolejemi, výhybkami a výhybkovými konstrukcemi a ze zvláštních účelových konstrukcí nebo konstrukčních článků. Základními součástmi železničního svršku jsou kolejnice, kolejnicové podpory, drobné kolejivo, upevňovadla a příp. kolejové lože. Jednotlivé součásti se zpravidla označují tvarem. Souhrn součástí železničního svršku, příslušející k určitému tvaru kolejnic, se nazývá soustava železničního svršku. Z těchto součástí se sestavují jednotlivé konkrétní sestavy železničního svršku. Existují následující dvě základní koncepce konstrukce železničního svršku:

- klasická konstrukce s pražci a kolejovým ložem;
- pevná jízdní dráha.

Zemní plán, konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku a část kolejového lože (popřípadě část konstrukčních vrstev pevné jízdní dráhy) pod ložnou plochou pražce nebo konstrukce pražec nahrazující vytvářejí pražcové podloží. Konstrukce pražcového podloží musí být dostatečně únosná, aby zajistila stabilitu koleje [14], [16].

Objekty železničního svršku a jejich uspořádání jsou předmětem evidence realizované v rámci informačního systému provozovatele dráhy. Sestává se zejména z projektové dokumentace, normativní, výkresové, mapové, pasportní, operativní a ekonomické evidence. Je vedena zpravidla na osobních počítačích pomocí jednotných specializovaných programů. Pro evidenci železničního svršku se pro operativně technické účely využívá zejména následující okruh agend, tzv. dílčí informační systém železničního svršku:

- pasport železničního svršku;
- nákresný přehled železničního svršku;
- nákresný přehled bezстыkové koleje;
- psaný přehled bezстыkové koleje;
- evidence provozních ověřování a zkušebních úseků;
- přehled správy majetku provozovatele dráhy.

Také o zkušebních úsecích zřízených za účelem provozního ověřování konstrukcí železničního svršku je vedena specializovaná evidence. Účastníci provozního ověřování do ní pravidelně ukládají zápisy o kontrolách ověřovaných předmětů a stavu zkušebního úseku.

Výrobky pro konstrukci železničního svršku jsou tzv. stanovenými výrobky dle zákona o technických požadavcích na výrobky [17]. Výrobce, dovozce nebo distributor musí zajistit shodu výrobku se základními požadavky. Shoda se ověřuje na základě prováděcího předpisu k zákonu o technických požadavcích na výrobky [18]. U výrobků, které mají bezprostřední vliv na kvalitu konstrukce železničního svršku a provozuschopnost železniční dopravní cesty, provádějí ověřování kvality přímo ve výrobním závodě kontrolaři pověřeného orgánu pro ověřování kvality. Pro případ systémů upevnění se jedná o pokladnice, upevňovadla (vrtule, pružné a distanční kroužky, svěrkové šrouby a matice), podložky pod patu kolejnice a pružné i tuhé svěrky a spony.

1.1.1 Upevnění kolejnic

Kolejnice se upevňují na podpory (příčný pražec, podélný pražec, deskový pražec, rámová konstrukce, betonová deska, osamělá podpora) pomocí upevňovadel a drobného kolejiva. Kolejnice se upevňují na podpory buď přímo, nebo prostřednictvím podkladnice, která roznáší napětí od účinků železničních vozidel na větší plochu. Pružnost upevnění je zajišťována pomocí pryžových nebo plastových podložek vkládaných mezi patu kolejnice a pražec resp. podkladnici a mezi podkladnici a pražec.

Při **přímém upevnění** jsou kolejnice, příp. kolejnice s podkladnicemi upnuty jedním systémem upevňovadel bezprostředně k podporám.

Při **nepřímém upevnění** jsou kolejnice upevněny k podkladnici jedním druhem upevňovadel a podkladnice k podpoře pak druhem dalším.

Tuhé nebo pružné upevnění kolejnic rozlišujeme podle typu použitých hřebů, svěrek nebo spon. U nás vžitý pojem „pružné upevnění“ je poněkud zavádějící. Pružné upevnění je upevnění, kde je pata kolejnice trvale přitlačována pružným elementem, a to i pod zatížením při průjezdu vlaku. Tímto pružným prvkem může být hřeb, svěrka nebo spona z kruhové nebo ploché oceli různých tvarů, s různým způsobem uchycení a předeptutí. Takto definované pružné upevnění tedy nemá nic společného se svislou pružností koleje. Svislá pružnost je v současné době zajišťována, jak již bylo uvedeno výše, pružnými podložkami pod patou kolejnice, popř. i pod podkladnicí.

Mezi **drobné kolejivo** se řadí podkladnice, můstkové desky, svěrky, spony, pryžové, penefolové, a polyetylenové podložky, vodící vložky a izolátory.

Do **upevňovadel** můžeme zařadit hřeby, vrtule a pražcové šrouby, spojkové a svěrkové šrouby, vložky M, pružné a zajišťovací kroužky, podložky a distanční kroužky [19].

1.1.1.1 Historický vývoj upevnění kolejnic

Prvopočátky použití konstrukce upevnění kolejnic na našem území lze datovat do období 1825 až 1832, kdy byla zprovozněna koněspřežná dráha České Budějovice – Linz, první svého druhu na evropském kontinentu vůbec. Upevňovadla a drobné kolejivo zde byly zastoupeny hřeby, dřevěnými klíny, čepy a litinovými stoličkami.

V počátcích výstavby železničních tratí s parním provozem (1839) se používaly dvouhlavé kolejnice válcované z kujného železa. Držebnost s dřevěnými příčnými pražci zajišťovaly těžké litinové stoličky přibité k pražcům pomocí železných hřebů. Kolejnice byla ke stoličce přichycena prostřednictvím dřevěných klínů. Tento typ upevnění byl označován jako Ib. Železniční svršek vyhovoval nápravovému zatížení 40 kN.

Na dřevěných mostech a ve výhybkách se postupně začaly používat Vignolovy kolejnice. Kolejnice se k pražcům přibíjely hákovými hřeby. Širokopatní kolejnice z válcované oceli pak postupně nahradily původní dvouhlavé kolejnice, které přestaly vyhovovat narůstajícímu zatížení a zvyšující se rychlosti. Pro lepší roznos sil z kolejnice do podpory sloužily odlévané či válcované podkladnice. S nástupem podkladnic došlo také k zřízení úklonu kolejnic. Úklon kolejnic směrem k ose koleje měl zajistit optimální působení

silových účinků mezi kolem a kolejnicí. Hřeby pro upevnění podkladnice k pražci byly později nahrazeny vrtulemi. Každá železniční správa používala různé typy a/nebo rozměry jednotlivých konstrukcí. Tento fakt způsobil, že v síti nově vzniklých Československých státních drah se v roce 1919 nacházelo téměř sto padesát různých soustav železničního svršku. Používaly se podkladnice stoličkové, hákové, klínové nebo rozponové. Již za první republiky tak bylo zahájeno postupné sjednocování soustav železničního svršku. Jeho hlavním smyslem byla a dodnes zůstává možnost efektivní údržby, snížení výrobních nákladů, dosažení maximální možné mechanizace traťových prací a snížení množství zásob náhradních součástí.

Po skončení druhé světové války započaly země západní Evropy rozsáhlé rekonstrukce jejich železniční sítě. Od 60. let minulého století zaměřily svoji pozornost zejména na zvyšování traťových rychlostí a komfortu osobní dopravy. Pozitivní motivaci představoval v tomto ohledu zejména konkurenční boj s rychle se rozmáhající silniční dopravou. Novým impulzem modernizace v Československu se stala především nutnost posílení výkonnosti tratí ve směru východ – západ. Je vhodné podotknout, že nárůst provozního zatížení byl na této relaci v rámci evropského měřítka zcela ojedinělý a vynutil si prakticky trvalý výzkum a vývoj jednotlivých prvků železničního svršku. Další požadavky si nárokovala také rychle se rozvíjející bezстыková kolej, prosazovaná již před válkou prof. Ing. Dr. Josefem Vavroukem, DrSc. z Vysokého učení technického v Brně. V poválečných letech zaujaly v její délce tratě Československých drah jedno z předních míst ve světě.

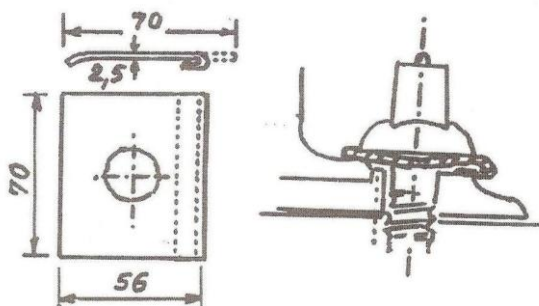
Od roku 1950 byla zavedena jednotná rozponová podkladnice T 5, užívaná pro upevnění kolejnic tvaru A a T a vyhovující později také pro kolejnice S 49 a R 65 (TR 5). K úspoře dřeva a oceli a jako reakce na velké provozní zatížení tratí se od roku 1955 začaly postupně zavádět betonové pražce. Pražce se vyráběly jednak z předpjatého betonu a jednak ze železobetonu. Vývoj betonových pražců byl pak prakticky nepřetržitý a vedle konstrukčních důvodů byl vyvolán i rozvojem výrobní technologie. S pražci z předem předpjatého strunobetonu SB 3 a VÚS 62 s ovíjenou výztuží vznikla také podkladnice T 8. Značná lomovitost rozponových podkladnic T 5 a T 8 a relativně náročná údržba rozchodu a směru koleje vedly k postupnému nahrazování rozponových podkladnic žebrovými S 4 a R 4 v systému upevnění K.

Současně se snahou o zvyšování rychlosti stále naléhavěji vyvstávala potřeba snížit tuhost upevnění kolejnic použitím pružných svěrek. Počáteční pokusy se svěrkou holandského typu ztroskotaly na kvalitě materiálu a technologii jeho zpracování. K řešení napomohla až změna hospodářského systému po roce 1990. Vývoj v tu dobu urychlila zejména rekonstrukce tzv. tranzitních železničních koridorů. Na nich se začaly používat ze zahraničí prověřené systémy pružného bezpodkladnicového upevnění kolejnic tvaru UIC 60.



Obr. 1-6 Předválečný vývoj upevnění kolejnic; vlevo upevnění Ib; vpravo přímé podkladnicové upevnění s hřeby na dřevěném pražci; zdroj: [20]

Stojí za zmínku, že patrně první pružné upevnění u nás vynalezl bývalý inspektor rakousko-uherské dráhy Ing. Emil Mašík, který byl později jmenován profesorem Vysokého učení technického v Brně. V roce 1910 byl na patentový úřad zapsán a od té doby četnými evropskými železničními společnostmi používán jako prostředek proti putování kolejnic tzv. „Mašíkův plíšek“ nebo „Mašíkovo pružné pero proti putování“. Tento prototyp dnešních pružných svěrek byl vyroben z ocelového plechu tloušťky 2,5 mm o rozvinutých rozměrech 70x70 mm a vyvozoval přitlačnou sílu 3 až 4 kN.



Obr. 1-7 Mašíkovo pružné pero proti putování; zdroj: [20]

1.1.1.2 Současnost

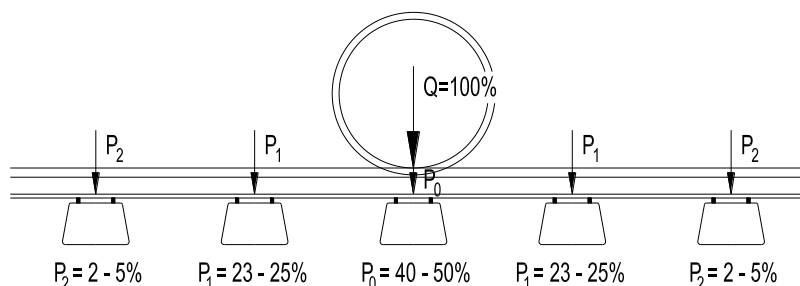
Současná železniční doprava vyžaduje vysoké nároky na konstrukce běžné koleje. Jsou vyvolány zejména potřebami správců a provozovatelů dráhy vyšší využitelnosti tratí při menších nákladech na údržbu, potřebami zvyšovat traťové a cestovní rychlosti, zlepšovat jízdní komfort a v neposlední řadě také snižovat emise hluku a vibrací. Konstrukce koleje včetně systémů upevnění musí být schopna těmto nárokům vyhovět. Mezi základní požadavky kladené na moderní systémy upevnění patří:

- spolehlivost;
- vysoká držebnost kolejnice v předepsaném úklonu a rozchodu;
- velký odpor kolejnice proti podélnému posunutí;
- elektrická izolace kolejnice vůči podpoře;
- snižování rázů a vibrací;

- jednoduchá montáž;
- nízké nároky na údržbu;
- dlouhá životnost;
- vysoká odolnost vůči extrémním podmínkám;
- zabezpečení proti zcizování a úmyslnému poškození;
- ekonomická efektivnost.

Původní principy zavádění pružných elementů upevnění na bázi „Fit and Forget“ využívané s úspěchem ve Spojených státech amerických se ukázaly v podmínkách střední Evropy jako ne zcela vhodné. Vlivem údržby železničního svršku či péče o konstrukce s ním spjatými není možné na upevnění kolejnic po jeho montáži definitivně „zapomenout“. Důraz kladený na snadnou montáž navíc přispěl k paradoxní situaci. Při stavbách a modernizacích hlavní železniční sítě se začaly poměrově k mechanizaci více využívat pomalé ruční práce, než tomu bylo na trasách menšího významu s tuhými systémy upevnění. V současnosti jsou již uplatňovány přístupy, kdy je prostřednictvím náročných technologií poskytnuta koncovému uživateli jednoduchá aplikace upevnění slibující jeho dlouhou životnost. Upevnění je zpravidla dodáváno jako součást vystrojených kolejnicových podpor přímo z výroby. K jednotlivým systémům upevnění jsou také poskytovány přiměřeně výkonné mechanismy, jež přispívají k omezení ruční práce a tím i k pozitivnímu vnímání moderních konstrukčních systémů upevnění.

Jednou z efektivních cest k naplnění výše zmíněných požadavků se jeví zpružňování uložení kolejnice. Hlavním efektem zpružňování je omezení negativních vlivů rázového zatížení a vibrací a snížení tlakového působení na úložné ploše kolejnicové podpory. Kolová síla z obr. 1-8 je tak ještě výrazněji rozložena po délce koleje. Literatura uvádí, že při aplikaci vysoce pružného upevnění připadá na úložnou plochu pražce pod působitěm kolové síly $24 \div 32 \%$ z původní velikosti kolové síly. Tím lze docílit lepší ochrany součástí železničního svršku a konstrukčních vrstev železničního spodku před účinky projíždějících vozidel. Současně také dochází ke snižování negativních účinků nehomogenity jízdní dráhy na kolejová vozidla. Při správné volbě upevnění lze navíc vlivem zpružnění jízdní dráhy zpomalit rozvoj skluzových vln na nepřevýšeném kolejnicovém pásu v obloucích o malých poloměrech.



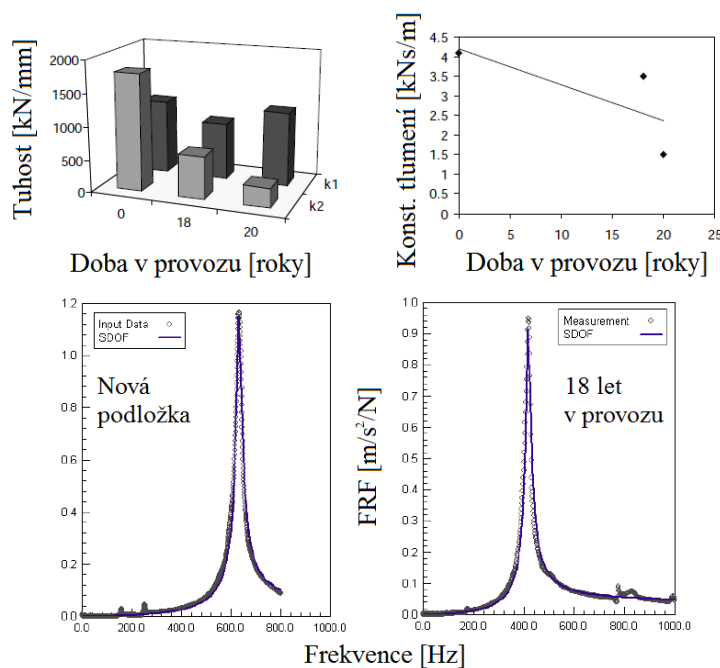
Obr. 1-8 Schéma roznosu kolové síly na jednotlivé pražce; zdroj: [19]

Hlavní prvek pro zvýšení svislé pružnosti představuje u bezpodkladnicových systémů upevnění podložka pod patu kolejnice nebo pod roznášecí desku, která je u podkladnicových systémů upevnění doplněna navíc o podložku pod podkladnici. Podložky se vyrábějí různých tloušťek, tvarů a povrchových úprav (hladké, rýhované, s výstupky nebo vtisky) uzpůsobeny

sestavám upevnění, pro něž jsou určeny. Volba materiálu pro výrobu podložky výrazně ovlivňuje její pružně-tlumicí charakteristiky. Nejčastěji se podložky pro upevnění kolejnic vyrábějí z následujících materiálů:

- pryžové směsi;
- etyl-vinyl-acetát EVA;
- mikropórovitý etylen-propylen EPDM;
- přírodní kaučuk;
- polyetylén PE;
- penefol (lehčený PE).

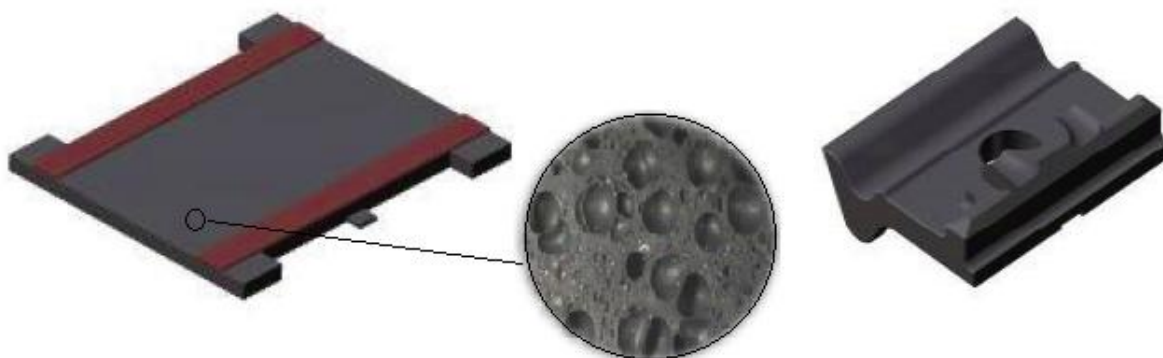
Je vhodné poznamenat, že charakteristiky podložek se v konstrukci upevnění mění v závislosti na čase. Výzkumy univerzity ve Wollongongu v Austrálii ukazují, že s přibývajícím rokem podložky v provozu se složka tuhosti k_2 nezávislá na frekvenčním spektru zátěže a složka tlumení c snižují. U tuhosti se jedná přibližně o 4 % pokles, zatímco u tlumení o 1,5 % pokles. Složka tuhosti k_1 , která je závislá na frekvenčním složení zátěže a s rostoucími frekvencemi se zvyšuje, vykazuje v průběhu času jen nepatrné změny. Oblast rezonančních frekvencí podložky se pak v průběhu času posouvá směrem k nižším frekvencím, viz obr. 1-9 [25, 26].



Obr. 1-9 Charakteristiky pružné podložky pod patu kolejnice měnící se v čase; zdroj [26]

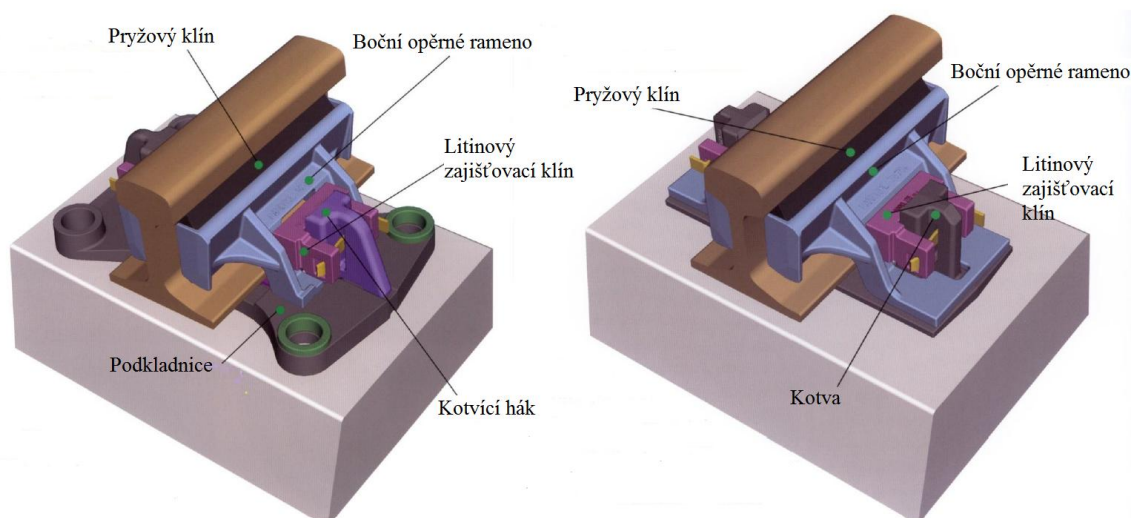
Problematiku zvyšování pružnosti uložení kolejnice je nutné řešit komplexně volbou vhodného materiálu a vhodného konstrukčního uspořádání jednotlivých dílů uzlu upevnění. Cílem je nejen zvýšení pružnosti uložení kolejnice, ale i omezení nepříznivého vyklápění kolejnice a docílení požadované životnosti celého uzlu upevnění. Zvýšené pružnosti uzlu upevnění musí odpovídat také vyšší únavový limit pružných svěrek a spon. Únavový limit definuje schopnost pracovních ramen svěrky či palce spony kmitat bez ohrožení jejich životnosti. Uvádí se hodnotou maximální dovolené výchylky kmitání [mm].

Pro účely zpružnění uložení kolejnice byly společností Vossloh AG vyvíjeny různé typy úhlových vodících vložek. Vložky jsou opatřeny vodící lištou na spodní ploše zasahující v montážní poloze pod patu kolejnice. Při nadměrném vyklopení či poklesu kolejnice dosedá pata kolejnice na vodící lištu, čímž zabránuje nadměrnému stlačování pružné podložky, resp. opotřebení úhlové vodící vložky otěrem o patu kolejnice. Jistou alternativou může být také použití podložky pod patu kolejnice s vyztuženými okraji. Jako velmi vhodný materiál pro tento typ podložek se ukázal mikropórovitý EPDM. Vyznačuje se malým poměrem mezi dynamickou a statickou sečnou tuhostí, vysokým stupněm útlumu dynamického zatížení, dlouhou životností a odolností vůči agresivnímu prostředí, resp. stálými charakteristikami v čase [21].

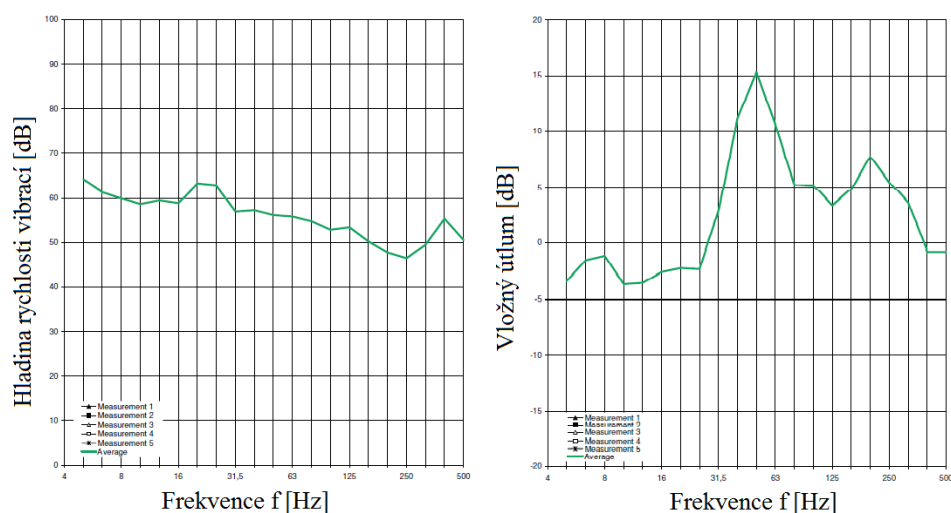


Obr. 1-10 Současné trendy ve vývoji komponent upevnění Vossloh; vlevo pružná podložka EPDM s vyztuženými okraji; vpravo úhlová vodící vložka s vodící lištou NT; zdroj: [21]

Trend v současném vývoji systémů upevnění představuje také snaha omezit negativní vlivy kolejové dopravy na životní prostředí. Společnost Pandrol vyvinula za účelem snížení vibrační samosvornou soustavu upevnění Vanguard vhodnou jak pro přímou kolej klasické konstrukce s kolejovým ložem, tak i pro kolej s pevnou jízdní dráhou [22]. Kolejnice je zde podepřena ve spodní oblasti hlavy prostřednictvím dvou pryžových klínů. Vyklápění kolejnice zabránují opěrná ramena obemykající její stojinu. Pružná podložka pod patou kolejnice tak pouze zabránuje rázům z případného přetížení koleje. Statická svislá tuhost upevnění Vanguard se pohybuje v rozmezí $5 \div 10 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$, dynamická tuhost pak v rozmezí $10 \div 30 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$. Hodnotící zpráva projektu RIVAS hovoří o útlumu rychlosti vibrací $5 \div 10 \text{ dB}$ na pevné jízdní dráze s upevněním Vanguard ve srovnání s referenční konstrukcí pevné jízdní dráhy s upevněním se svislou tuhostí $25 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$. Útlum byl patrný v třetinooktávoých frekvenčních pásmech od 31,5 Hz výše, viz obr. 1-11. Aplikace vysoce pružného systému upevnění kolejnic se v poměru účinnosti a ekonomické náročnosti na výstavbu jevila jako velmi efektivní. Nevýhodou vysoce pružného upevnění může být nárůst hladiny hluku. Na základě numerických simulací se očekává nárůst hladiny akustického tlaku max. o 1 dB(A) [23], [24].



Obr. 1-11 Upevnění Pandrol Vanguard; zdroj: [22]



Obr. 1-12 Třetinooktávové charakteristiky upevnění Pandrol Vanguard; zdroj: [23]

Podle obecných technických podmínek pro upevnění kolejnic [27] jsou podložky pod patu kolejnice členěny dle statické sečné tuhosti na:

- měkké s tuhostí menší než $80 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$;
- střední s tuhostí větší nebo rovnou $80 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ a současně menší než $150 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$;
- tvrdé s tuhostí větší nebo rovnou $150 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$.

Dle schopnosti uzlu upevnění tlumit rázové zatížení je upevnění rozděleno na:

- s nízkým útlumem $< 15 \%$;
- se středním útlumem $15 \div 30 \%$;
- s vysokým útlumem $> 30 \%$.

Tab. 1-2 uvádí příklady sestav železničního svršku používaných ve vybraných státech Evropské unie. Je patrné, že správci zahraničních drah využívají podložky pod patu kolejnice v široké škále statických tuhostí mezi $50 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ až $600 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$.

Členský stát	Kolejnice	Statická tuhost podložky pod patu kolejnice	Pražce
Španělsko	<u>VRT:</u> 60 E1 (60E2); <u>Konvenční tratě:</u> 54 E1; 60 E1 (60E2);	$100 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$; $500 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ (VRT Madrid – Sevilla);	<u>VRT:</u> Betonové monoblokové pražce AI-04 (hmot. 315 kg); <u>Konvenční tratě:</u> 65 % betonové monoblokové pražce; 20 % betonové dvoublokové pražce; 15 % dřevěné pražce;
Německo	<u>Hustě obydlené oblasti:</u> 75 % 60 E1 (60 E2); 10 % 54 E1; 15 % ostatní;	<u>Směšaná doprava</u> $V \leq 160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$: $600 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$; <u>Osobní doprava</u> $V > 160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$: $60 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$;	<u>Hustě obydlené oblasti:</u> 45 % betonové monoblokové pražce B 70; 15 % dřevěné pražce; 30 % smíšené pražce; 10 % ostatní;
Švýcarsko	<u>Hlavní tratě:</u> 60 E1 (60 E2); <u>Ostatní tratě:</u> 54 E1;	$600 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$;	Betonové monoblokové pražce B 91; Dřevěné pražce; Ostatní;
Francie	60 E1 (60 E2); UIC 50;	$150 \div 160 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$;	Betonové dvoublokové pražce (hmot. 250 kg); Betonové monoblokové pražce (hmot. 285 kg);
Švédsko	—	$50 \div 70 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$;	60 % betonové pražce; 40 % dřevěné pražce;

Tab. 1-2 Příklady sestav železničního svršku vybraných zemí EU; zdroj: [23]

1.2 Provozní ověřování upevnění kolejnic

Postup porovnávacího zkoušení systémů upevnění v koleji stanovuje norma ČSN EN 13146-8 [28]. Postup zkoušky je platný pouze pro úplné sestavy upevnění. Zkoušený systém upevnění se namontuje do koleje současně s referenčním systémem upevnění na příčné nebo výhybkové pražce nebo pevnou jízdní dráhu, které jsou ze stejného materiálu a jsou stejného konstrukčního provedení. Každý ze zkoušených a referenčních systémů upevnění musí být namontován v jedné koleji na délku obsahující nejméně 500 pražců (u systémů metra 200 pražců) nebo odpovídající délku pevné jízdní dráhy. Montáž musí být provedena během období maximálně 7 dní. Všechny systémy upevnění musí být při zkoušce namontovány na tom typu pražců, pro který jsou navrženy, a při zkoušce se musí použít pouze jeden typ pražců. Při zkoušce musí být všechny systémy upevnění namontovány v koleji s podobným stavem pláň tělesa železničního spodku, šterkového lože, oblouků, sklonu a převýšení, a s podobnými provozními podmínkami, včetně rozsahu a druhu provozu, rychlosti, brzdění a rozjíždění.

Pokud by montáž zahrnovala výměnu pražců, musí být kolej před zahájením zkoušky konsolidována strojně nebo projetím zátěže $1 \cdot 10^5$ t. Musí se zaznamenat následující údaje:

- metoda pokládky pražců, výhybkových pražců či nosné desky pevné jízdní dráhy;
- metoda montáže součástí upevnění;
- metoda montáže kolejnic;
- povětrnostní podmínky při pokládce.

Kolejnice použité při zkoušce musí mít stejnou jakost a tvar v celé délce zkušebního úseku. Hlavy kolejnic musí být v celé délce zkušebního úseku bez vad a shodné, spodní strana pat kolejnic musí být hladká. Svařené nebo montované styky musí být přewislé nebo podepřeny tak, jak je to obvyklé u uživatele. V průběhu zkoušky musí být všechny montované styky řádně udržovány. Každá údržba trati musí být v celé délce zkušebního úseku prováděna ve stejném časovém období.

Minimální doba zkoušení musí být nejméně taková, aby po zkušebním úseku projela níže uvedená zátěž, minimálně však 1 rok.

- | | |
|--|------------------|
| - pro systémy upevnění kategorie A a B (viz tab. 1-1) | $1 \cdot 10^7$ t |
| - pro systémy upevnění kategorie C, D a E (viz tab. 1-1) | $2 \cdot 10^7$ t |

Po dobu trvání zkoušky musí být všechny systémy upevnění udržovány podle pokynů výrobců.

Před zahájením měření musí být chování systému upevnění opticky kontrolováno a zaznamenáno v průběhu montáže a konsolidace koleje. Při zahájení, v kterékoli stanovené mezilehlé etapě a na konci zkoušky, se musí u všech zkoušených systémů, včetně referenčního systému, změřit nebo vizuálně posoudit následující veličiny:

- a) rozchod koleje;
- b) podélné posunutí kolejnic vůči pražcům nebo podpoře pevné jízdní dráhy a maximální denní rozpětí teploty;

- c) vliv na chování zabezpečovacího zařízení;
- d) svěrná síla na nejméně 10 sestavách podle výrobcem doporučené zkušební metody pro použití v koleji;
- e) statická tuhost podložek pod patu kolejnice měřená dle ČSN EN 13146-9+A1 [35] nejméně u 10 podložek, pokud to zákazník vyžaduje;
- f) detaily montážních metod a počasí v průběhu montáže;
- g) bezpečnost upevnění k pražcům;
- h) stav hlavy kolejnice;
- i) stav pražců, včetně oblasti úložných ploch;
- j) stav jednotlivých součástí upevnění;
- k) snadnost montáže a demontáže pomocí nářadí doporučeného výrobcem.

Pro d), i), j) a k) se musí v rámci zkoušky vybrat namátkově nejméně 2 % sestav. Pro opakované měření a sledování se musí vždy vybrat stejné sestavy.

1.3 Koncepce používání systémů upevnění v České republice

Pro použití v kolejích železničních drah ve vlastnictví České republiky jsou schváleny typy upevnění, které svou konstrukcí a vlastnostmi odpovídají charakteru provozu a stavebním podmínkám železničních drah v České republice. Jejich chování musí být řádně doloženo a ověřeno. Vzhledem k rozsahu železniční sítě není účelné sortiment běžně používaných typů upevnění dále rozšiřovat. Pouze pro úseky kolejí se zvláštními podmínkami je možné použít odlišné typy upevnění reagující svou konstrukcí na odlišnosti místních poměrů (např. upevnění se zvýšenou pružností v místech s nedostatečnou tloušťkou kolejového lože nebo v obloucích malého poloměru s velkým provozním zatížením, upevnění pro pevnou jízdní dráhu nebo pro přímé uložení koleje na mostech, upevnění se zvláštními požadavky na elektroizolační vlastnosti, upevnění se zvýšeným útlumem hluku a vibrací atd.).

Pro běžné použití jsou schváleny následující typy upevnění:

- tuhé podkladnicové se svěrkami ŽS 4 (K);
- pružné podkladnicové se svěrkami Skl 24 (KS);
- pružné podkladnicové se sponami „e“ s adaptérem (Ke);
- pružné bezpodkladnicové (W 14);
- pružné bezpodkladnicové určené do specifických podmínek (W 14NT a E 14);
- pružné bezpodkladnicové FASTCLIP bez zajištění druhotné tuhosti (FC I);
- pružné bezpodkladnicové FASTCLIP se zajištěním druhotné tuhosti (FC II);
- pružné bezpodkladnicové upevnění pro ocelové pražce Y (S 15).

V zájmu usnadnění správcovského dohledu, údržby a oprav železničního svršku, v zájmu minimalizace zásob materiálu (náhradních dílů a záložních součástí) a v zájmu efektivního využití mechanizace a nářadí je třeba, aby každý z výše uvedených typů upevnění byl používán vždy v souvislém úseku v rámci uceleného stavebního a organizačního celku.

Předpokládané použití jednotlivých typů upevnění v hlavních traťových a průběžných staničních kolejích tratí zařazených do transevropského konvenčního železničního systému a některých dalších dopravně významných tratí je znázorněno na obr. 1-13. Při výběru typu upevnění byl zohledněn charakter trati, její předpokládané dlouhodobé zatížení a výhledové využití. V souladu s celoevropskými vývojovými trendy je pro všechny uvedené tratě předpokládáno využití bezpodkladnicového upevnění.

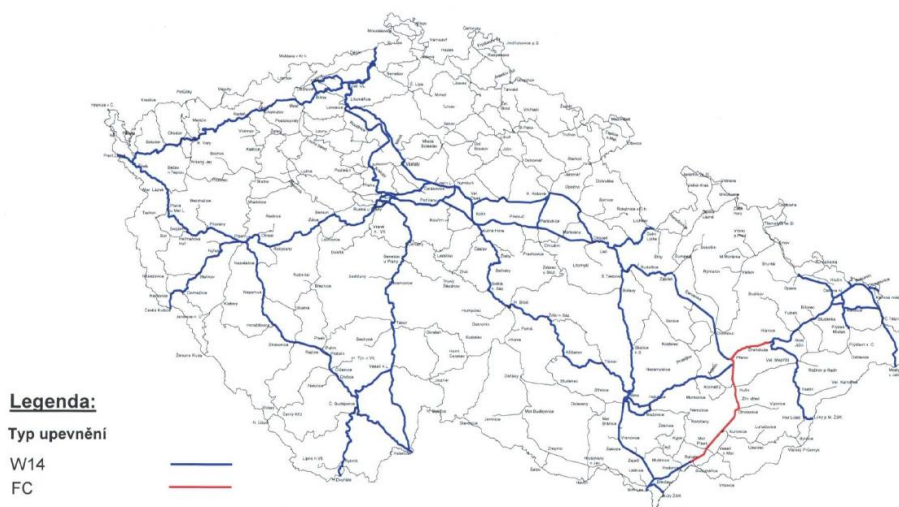
V předjízdňých staničních kolejích se obvykle použije materiál z výzisku z hlavních kolejí s upevněním KS nebo K. V případě použití nového materiálu v předjízdňých staničních kolejích se použije zpravidla stejný typ upevnění jako v hlavních kolejích.

Vzhledem k tomu, že upevnění Ke je nutno montovat vždy ručně (pro toto upevnění neexistují mechanizační prostředky), neuvažuje se s jeho používáním v běžné koleji. V úsecích, kde je předpokládáno podkladnicové pružné upevnění, se použije upevnění KS.

U ostatních tratí, kde specifikace typu upevnění není uvedena na obr. 1-13, se v případě rozsáhlejší výměny kolejového roštu počítá převážně s použitím výzisku z investičních akcí na hlavních tratích s podkladnicovým tuhým upevněním K. Při rekonstrukci materiálem novým se upřednostňuje bezpodkladnicové upevnění zpravidla stejného typu, jaký je

uvažován na hlavních tratích v obvodu působnosti příslušného správce dopravní cesty. V případě oprav a obnov lokálního charakteru je na těchto tratích možno využít vyzískané upevnění stejného typu, který je použit v navazujících úsecích. Základním vodítkem pro rozhodování o použití jednotlivých typů upevnění je předpis správce dráhy [14]. Podrobnou konkretizaci typu upevnění v jednotlivých kolejích je nutno při přípravě investičních akcí provést a odsouhlasit v rámci zpracovávání a projednávání projektové a zadávací dokumentace stavby.

Při výměnách upevňovadel v kolejích (náhrada tuhých svěrek řady ŽS pružnými svěrkami) je nutno vždy provést výměnu podložek pod patu kolejnice a svěrkových šroubů a posoudit, zda nejsou deformovány výřezy v žebrech podkladnic.



Obr. 1-13 Koncepce používání jednotlivých typů upevnění kolejnic; zdroj: [29]

1.4 Vybrané sestavy železničního svršku

K podrobnějšímu rozboru byly vybrány konstrukce železničního svršku v soustavě UIC 60 uvedené v tab. 1-3. Statické sečné tuhosti podložek pod patu kolejnice pro upevnění Vossloh W 14 a W 14NT, resp. pro upevnění KS, jsou stanoveny postupem obecných technických podmínek při zatížení $20 \div 70$ kN. Správcem dráhy je pozorováno, že takto získané hodnoty vycházejí v přepočtu přibližně 1,8 až 2 krát menší, než výsledky statické zkoušky tuhosti dle normy ČSN EN 13146-9+A1. Metodikou z normy jsou stanoveny tuhosti podložek pro upevnění Vossloh E 14, W 21NT, W 28NT a 300. Statická sečná tuhost podložky 6530 použité v upevnění FC I je získána na základě pracovních instrukcí výrobce při zatížení $20 \div 90$ kN. Výrobce ocelových pražců tvaru Y tuhost podložky Zw 401 v systému upevnění S 15 neuvádí. Obecně se předpokládá dostatečná pružnost ocelových pražců.

Kolejnicová upevnění Pandrol FC I a zejména Vossloh W14 jsou nejběžněji používaná pružná bezpodkladnicová upevnění v České republice. Jsou dostatečně prověřena provozem a zahraniční i tuzemské zkušenosti hovoří i jejich velké spolehlivosti. Lze se s nimi setkat ve všech modernizovaných úsecích tranzitních železničních koridorů a drah celostátního významu.

Podkladnicové upevnění KS se svěrkami Skl 12 se smí nově vkládat pouze v určených místech železničního svršku, jako jsou např. železniční přejezdy v koleji s minimálním poloměrem oblouku 500 m, kde konstrukce přejezdových panelů neumožňuje vložení svěrek Skl 24. Od používání pružných svěrek Skl 12 se upustilo kvůli jejich zvýšené lámavosti a tendenci pracovních ramen svěrky vtisknout se mezi patu kolejnice a žebro podkladnice užitého materiálu.

Bezpodkladnicové upevnění Vossloh W 14NT je vybaveno úhlovými vodicími vložkami Wfp 14K NT opatřenými na spodní ploše speciální vodicí lištou. Tato lišta zasahuje v montážní poloze pod patu kolejnice, čímž zabraňuje nadměrnému vyklápění či poklesu kolejnice. Z tohoto důvodu je upevnění W 14NT s výhodou používáno v koleji se směrovými oblouky o poloměrech menších než 500 m a v dalších úsecích, kde je s ohledem na konfiguraci koleje a charakter železničního provozu nebezpečí zvýšeného bočního namáhání kolejového roštu s vysokým provozním zatížením.

Bezpodkladnicové upevnění Vossloh E 14 se řadí mezi upevnění se zvýšenou svislou pružností. Použit upevnění E 14 je vhodné tam, kde je potřeba zvýšit tlumení dynamických účinků. Konstrukce tohoto upevnění vychází principiálně z upevnění typu 300 určeného pro pevnou jízdní dráhu. Vysoce pružná podložka Zw E14 NT/150 částečně nahrazuje tlumící účinky kolejového lože, takže upevnění E 14 lze s výhodou použít například v místech, kde není možné zřídit kolejové lože dostatečné tloušťky. Toto upevnění se nesmí vkládat do oblouků o poloměrech menších než 500 m, kvůli možnému vyklápění kolejnice. V místech, kde kolej s upevněním E 14 navazuje na kolej s upevněním W 14 nebo K se zřídí přechodový úsek. V přechodovém úseku jsou používány podložky pod patu kolejnice se statickou svislou tuhostí $40 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$.

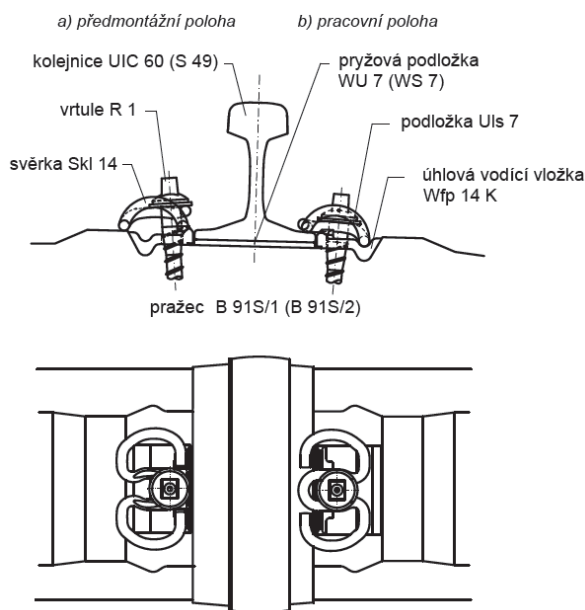
Bezpodkladnicové upevnění Vossloh W 21NT procházelo v České republice v době realizace měření stádiem provozního ověřování. Jedná se o upevnění s vysoce pružnou podložkou pod patu kolejnice Zw 1000/150 HS-35. Této zvýšené svislé pružnosti odpovídá také vyšší únavový limit svěrek Skl 21. Vývojově mladší konstrukcí je pak typ Vossloh W 28NT s upravenou tuhostí pružné podložky pod patu kolejnice Zw 700NT/139/160-60 a s pružnou svěrkou Skl 28, která má oproti svěrci Skl 21 únavový limit ještě vyšší. Oblast použití upevnění W 21NT resp. W 28NT je obdobná jako u upevnění W 14NT.

Alternativou k použití příčných kolejnicových podpor klasické konstrukce (tj. zpravidla betonových monoblokových pražců) je kolejový rošt s ocelovými pražci tvaru Y s přímým bezpodkladnicovým upevněním S 15. Pražce Y jsou v porovnání s příčnými pražci kratší, mají nižší konstrukční výšku a nižší hmotnost. Klíčovou výhodou je jejich vysoký příčný odpor. Ten může být v závislosti na příčném vysunutí pražce i více než dvojnásobný než odpor standardně používaných příčných betonových pražců [30]. Při zachování standardní šířky šterkového lože nebo jiných mimořádných opatření to umožňuje použití bezстыkové koleje i v méně příznivých poměrech. Při zúžení koruny kolejového lože by měly Y pražce zajistit srovnatelnou stabilitu bezстыkové koleje, jako kombinace betonových pražců a kolejového lože standardní šířky. Zúžený tvar kolejového lože navíc umožňuje zmenšení šířky pláně tělesa železničního spodku. Podstatnou výhodou zúžené pláně tělesa železničního spodku je možnost rekonstrukce regionálních tratí vedených v husté zástavbě, kde zřízení železničního spodku normových rozměrů není z hlediska prostorových poměrů možné. Další výhody kolejového roštu s pražci tvaru Y přináší použití v trati se stávající šířkou pláně tělesa železničního spodku 6000 mm. Zúžené kolejové lože zde přináší výraznou variabilitu při směrovém vyrovnání rekonstruované trasy v rámci zachování prostorové polohy pláně tělesa železničního spodku. Možný radiální posun osy koleje se v takovém případě pohybuje kolem vzdálenosti cca ± 300 mm. Druhou možností je návrh většího poloměru směrového oblouku koleje při zachování tečnového polygonu, což může být zvláště efektní při použití v obloucích o malém poloměru a malém středovém úhlu (tímto způsobem lze zlepšit hodnoty vybraných parametrů konstrukčního uspořádání koleje při zachování stejné traťové rychlosti nebo naopak). Dostatečný elektrický odpor upevnění S 15 je dosažen prostřednictvím plastové podložky a klínové desky pod patu kolejnice, úhlových vodicích vložek a polyamidových hmoždinek zabudovaných do pražce.

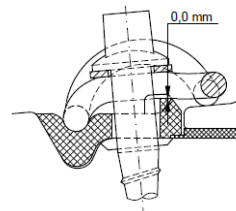
Pevná jízdní dráha je alternativou klasické kolejové dráhy s kolejovým ložem vhodná zejména pro použití na vysokorychlostních tratích. Díky nízké konstrukční hmotnosti se pevná jízdní dráha v zahraniční často vyskytuje na mostních objektech. Nízká konstrukční výška a možnost pojíždění vozidla záchranných systémů vedou také k jejímu častému využití v tunelech (v České republice Střelenský tunel, Ejpovické tunely). Vysoce pružný systém upevnění 300 se používá např. ve spojení s pevnou jízdní dráhou RHEDA 2000 nebo ÖBB-PORR. Systém 300 je navržen tak, aby zajistil sekundární vypružení trati a zabránil tak zdvihu paty kolejnice. Vložení pevné jízdní dráhy do tratí v České republice vyžaduje souhlas správce dráhy [31].

Typ upevnění	Statická sečná tuhost podložky [kN·mm ⁻¹]	Kolejnicová podpora	Datum vložení	Způsob ověřování	Číslo obrázku
W 14	55 ÷ 75 (dle OTP)	Betonový monoblokový pražec B 91S/1 s polyamidovou otevřenou hmoždinkou	1997 (Bílovice); 2002, 2012 (laboratoř); 2004 (Hranice); 2005 (Třebová) 2013 (ZC Velim)	In situ; in labo	1-14
FC I	40 ÷ 55 (stanovena dle postupu výrobce)	Betonový monoblokový pražec B 91P s kotvami FastClip a bočním izolátorem 7049	1997 (Bílovice); 1999 (Napajedla); 2002 (laboratoř); 2004 (Hranice);	In situ; in labo	1-15
KS	90 ÷ 120 (dle OTP)	Betonový monoblokový pražec SB 8P s polyamidovou otevřenou hmoždinkou	2005 (Počátky); 2006 (Malíkov)	In situ	1-16
S 15	Neuvedena	Ocelový pražec Y s rozevřením 650 mm	2005 (Počátky); 2005 (Popelín)	In situ	1-17
W 14NT	55 ÷ 75 (dle OTP)	Betonový monoblokový pražec B 91S/1 s polyamidovou otevřenou hmoždinkou	2012, 2015 (laboratoř)	In labo	1-18
E 14	27,5	Betonový monoblokový pražec B 91S/1 s polyamidovou otevřenou hmoždinkou	2012 (laboratoř)	In labo	1-19
W 21NT	35	Betonový monoblokový pražec B 91S/1 s polyamidovou otevřenou hmoždinkou	2012, 2015 (laboratoř)	In labo	1-20
300	22,5	Betonový pražec dvoublokový B 355.3 U60M (součást PJD RHEDA 2000)	2005 (Třebová)	In situ	1-21
W 28NT	60	Betonový monoblokový pražec B 91S/1 s polyamidovou otevřenou hmoždinkou	2015 (laboratoř)	In labo	1-22

Tab. 1-3 Vybrané sestavy upevnění kolejnic v soustavě UIC 60; zdroj: autor

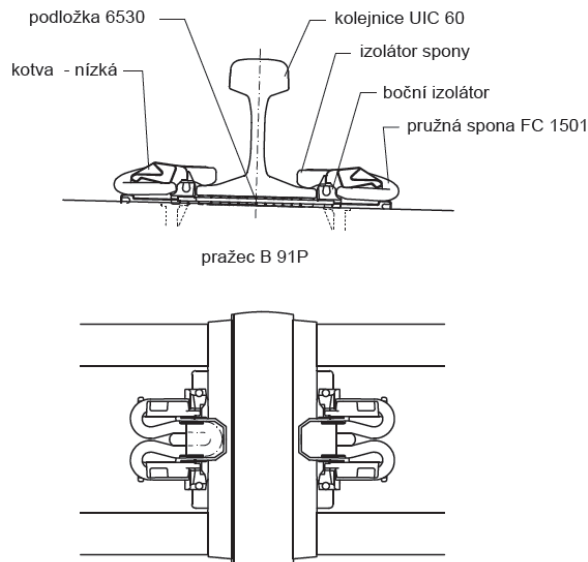


Kolejnice	UIC 60
pražce	B 91S/1
pružné svěrky	Skl 14
vrtule	R 1
podložky pod hlavu vrtule	Uls 7
pryžové podložky pod patu kolejnice	WU 7 // Zw 900NT/150 (165 x 160 x 9)
úhlové vodicí vložky	Wfp 14K 600 // Wfp 14KNT
spojky	U 60I
šrouby spojkové a matice	M 24 x 165 a M 24
dvojitě pružné kroužky Fe 6	pod matici spojkového šroubu



Druh pražce	Betonový pražec s hmoždinkami z PA 30SV ⁽⁹⁾
Způsob montáže	a) Zatáčečka s nastavitelným utahovacím momentem b) Momentový klíč ⁽¹⁾
Požadovaný stav po montáži	Dosednutí středního ramene svěrky do lůžka plastové úhlové vodicí vložky
Hodnota utahovacího momentu	doporučená 180 - 220 Nm limitní max. 220 Nm
Kontrola správnosti montáže	Pohledem Momentovým klíčem ⁽²⁾
Poznámka	Vrtule musí být před montáží ošetřena předepsaným mazacím prostředkem ⁽⁵⁾

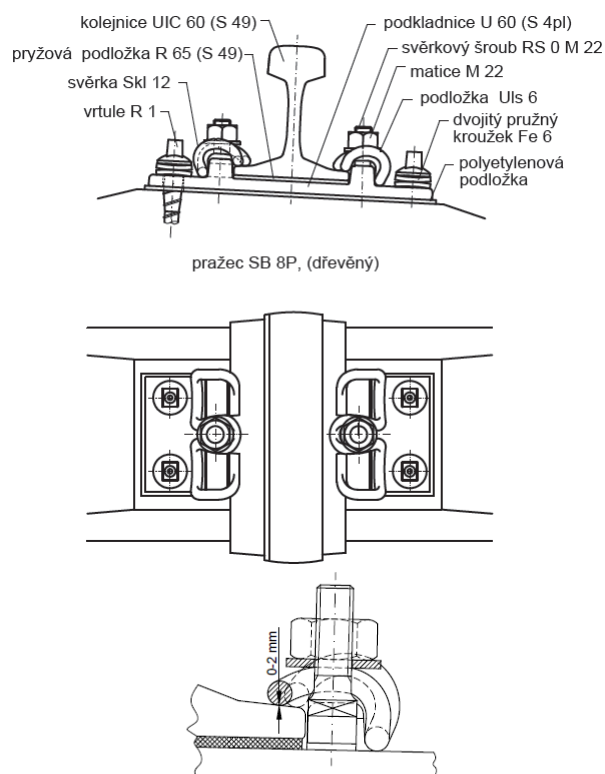
Obr. 1-14 Upevnění Vossloh W 14; vlevo schéma upevnění; vpravo nahoře přehled materiálu upevnění; vpravo dole postup montáže upevnění; zdroj: [14]



Kolejnice	UIC 60
pražce	B 91P
pružné spony	FC 1501
podložka pod patu kolejnice	6530
izolátor spony	8494
boční izolátor	7049
kotva Fastclip	7840 (8081)
šrouby spojkové	M 24 x 165 a M 24
spojky	U 60I
dvojitě pružné kroužky Fe 6	pod matici spojkového šroubu

Způsob montáže	a) Montážní ruční páka pro sponu Fastclip b) Stroje pro zasouvání a vysouvání spony Fastclip
Požadovaný stav po montáži	Zapadnutí vybrání na koncích vnějších ramen spony Fastclip na výstupky v kotvě
Hodnota utahovacího momentu	doporučená limitní
Kontrola správnosti montáže	Pohledem
Poznámka	

Obr. 1-15 Upevnění Pandrol FC I; vlevo schéma upevnění; vpravo nahoře přehled materiálu upevnění; vpravo dole postup montáže upevnění; zdroj: [14]



Kolejnice	UIC 60		
pražce	dřevěné	SB 6, SB 6P	SB 8P
podkladnice žebrové	U 60-40 ^{*)} , R 4, U 60 ^{**)} U 60-40M, R 4M ^{***)}	R 4	U 60
pružné svěrky	Skl 12 / Skl 24		
šrouby svérkové a matice	RS 0 M 22 a M 22		
podložky pod matice	Uls 6		
svérkových šroubů			
vrtule	R 1		
spojky	U 60I		
šrouby spojkové a matice	M 24 x 165 a M 24		
pryžové podložky pod patu kolejnice	151 x 183 x 6		
polyetylenové podložky pod podkladnice	380 x 160 x 2		
dvojitě pružné kroužky Fe 6	pod matici spojkového šroubu a pod hlavu vrtule		

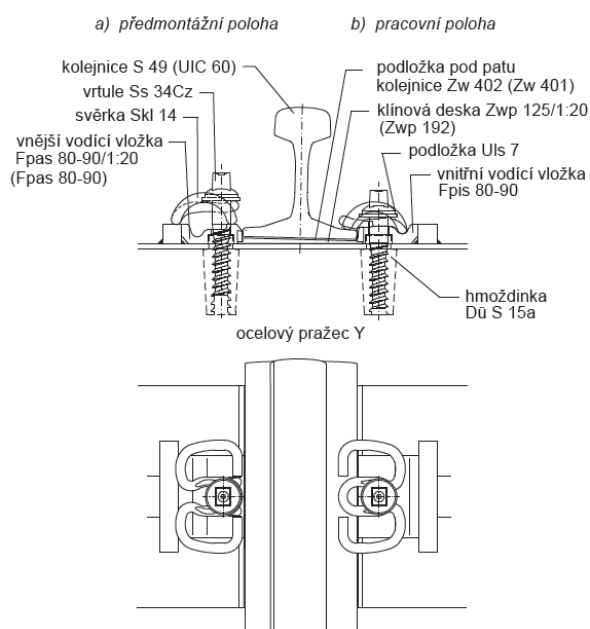
*) Podkladnice U60-40 je určena pro uložení kolejnic v úklonu 1:40;

**) Podkladnice U 60 a S 4pl na dřevěných pražcích se používají v upevnění ve výhybkových spojeních a rozvětveních a ve zvláštních konstrukcích koleje;

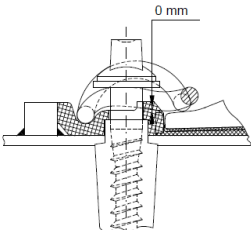
***) Podkladnice U 60-40M, R 4M a S 4M se použijí pro upevnění na mostních, pokud není použita sestava s distančními kroužky;

Způsob montáže		a) Zatačička s nastavitelným utahovacím momentem b) Momentový klíč ⁽¹⁾
Požadovaný stav po montáži		Vzdálenost mezi středním ramenem svěrky a horním povrchem paty kolejnice 0 - 2 mm
Hodnota utahovacího momentu	doporučená	180 - 220 Nm
	limitní	max. 250 Nm
Kontrola správnosti montáže		Plochou měrkou ⁽³⁾ Momentovým klíčem ⁽²⁾
Poznámka		Závit svérkového šroubu musí být před montáží ošetřen předepsaným mazacím prostředkem ⁽⁵⁾

Obr. 1-16 Upevnění KS; vlevo schéma upevnění; vpravo nahoře přehled materiálu upevnění; vpravo dole postup montáže upevnění; zdroj: [14]

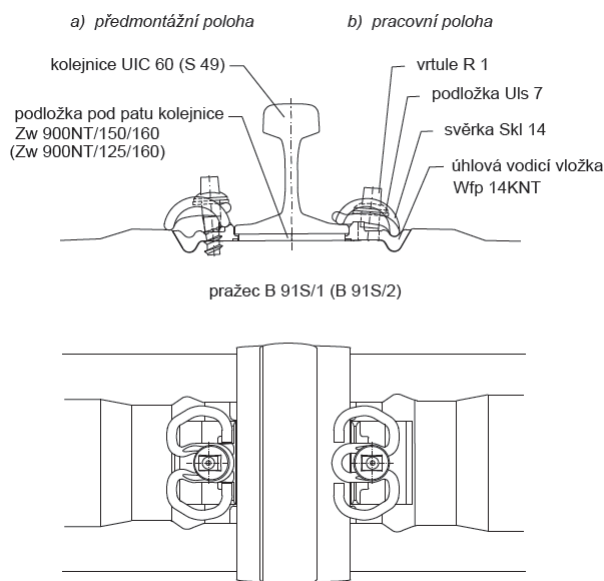


Kolejnice	S 49 (UIC 60)
pražce	ocelové Y
pružné svěrky	Skl 14
vrtule	Ss 34Cz
hmoždinka	Dů S 15a
klínová deska	Zwp 125/1:20 (Zwp 192)
podložka pod patu kolejnice	Zw 402 (Zw 401)
vodicí vložky	vnitřní: Fpis 80-90 vnější: Fpas 80-90/1:20 (Fpas 80-90)

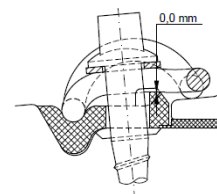


Druh pražce	Ocelový pražec Y s hmoždinkami Dů S 15a		
Způsob montáže	a) Zatačička s nastavitelným utahovacím momentem b) Momentový klíč ⁽¹⁾		
Požadovaný stav po montáži	Dosednutí středního ramene svěrky do lůžka plastové vodicí vložky		
Hodnota utahovacího momentu	doporučená	180 - 220 Nm	max. 220 Nm
Kontrola správnosti montáže	Pohledem Momentovým klíčem ⁽²⁾		
Poznámka	Vodicí vložka musí před i během montáže plně dosedat na úložnou plochu pražce. Horní obdélníková část hmoždinky musí být zasunuta do vybrání ve vodicí vložce. Vrtule musí být před montáží ošetřena předepsaným mazacím prostředkem ⁽⁵⁾		

Obr. 1-17 Upevnění Vossloh S 15; vlevo schéma upevnění; vpravo nahoře přehled materiálu upevnění; vpravo dole postup montáže upevnění; zdroj: [14]

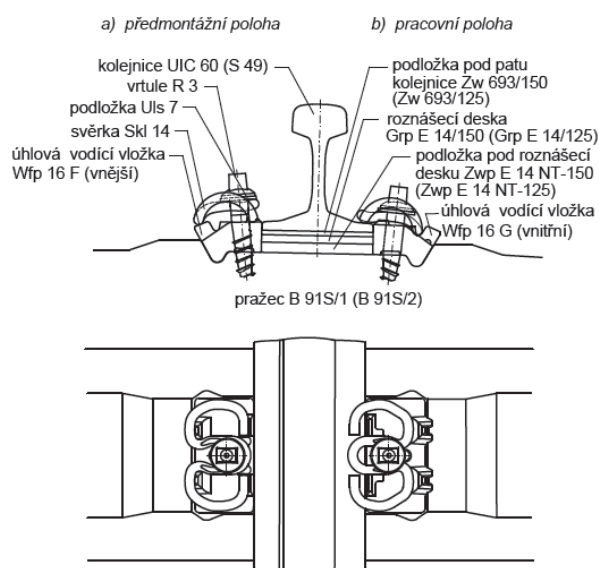


Kolejnice	UIC 60
pražce	B 91S/1
pružné svěrky	Skl 14
vrtule	R 1
podložky pod hlavu vrtule	Uls 7
pryžové podložky pod patu kolejnice	WU 7 // Zw 900NT/150 (165 x 160 x 9)
úhlové vodicí vložky	Wfp 14K 600 // Wfp 14KNT
spojky	U 60I
šrouby spojkové a matice	M 24 x 165 a M 24
dvojitě pružné kroužky Fe 6	pod matici spojkového šroubu

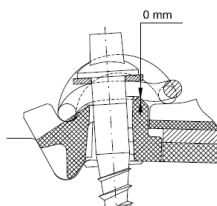


Druh pražce	Betónový pražec s hmoždinkami z PA 30SV ⁽⁹⁾	
Způsob montáže	a) Zatáčečka s nastavitelným utahovacím momentem b) Momentový klíč ⁽¹⁾	
Požadovaný stav po montáži	Dosednutí středního ramene svěrky do lůžka plastové úhlové vodicí vložky	
Hodnota utahovacího momentu	doporučená	180 - 220 Nm
	limitní	max. 220 Nm
Kontrola správnosti montáže	Pohledem Momentovým klíčem ⁽²⁾	
Poznámka	Vrtule musí být před montáží ošetřena předepsaným mazacím prostředkem ⁽⁵⁾	

Obr. 1-18 Upevnění Vossloh W 14NT; vlevo schéma upevnění; vpravo nahoře přehled materiálu upevnění; vpravo dole postup montáže upevnění; zdroj: [14]



Kolejnice	UIC 60
pražce	B 91S/1
pružné svěrky	Skl 14
vrtule	R 3
podložky pod hlavu vrtule	Uls 7
spojky	U 60I
šrouby spojkové a matice	M 24 x 165 a M 24
podložky pod patu kolejnice	Zw 693/150
roznášecí deska	Grp E 14/150
dvojitě pružné kroužky Fe 6	pod matici spojkového šroubu
podložka pod roznášecí desku	Zwp E 14 NT-150 ¹⁾
vodicí vložka vnitřní	Wfp E 16 G (vnitřní)
vodicí vložka vnější	Wfp E 16 F (vnější)



Druh pražce	Betónový pražec s hmoždinkami z PA 30SV ⁽⁹⁾	
Způsob montáže	a) Zatáčečka s nastavitelným utahovacím momentem b) Momentový klíč ⁽¹⁾	
Požadovaný stav po montáži	Dosednutí středního ramene svěrky do lůžka plastové vodicí vložky	
Hodnota utahovacího momentu	doporučená	180 - 220 Nm
	limitní	max. 220 Nm
Kontrola správnosti montáže	Pohledem Momentovým klíčem ⁽²⁾	
Poznámka	Vrtule musí být před montáží ošetřena předepsaným mazacím prostředkem ⁽⁵⁾	

Obr. 1-19 Upevnění Vossloh E 14; vlevo schéma upevnění; vpravo nahoře přehled materiálu upevnění; vpravo dole postup montáže upevnění; zdroj: [14]

Poznámky k obrázkům:

(1) Montáž je možno provést i klíči běžně používanými pro ruční zatáčení matic nebo vrtulí. Ručními klíči se provede podstatná část utažení příslušného prvku a momentový klíč se použije v poslední fázi utahování k zajištění potřebné hodnoty utahovacího momentu. Pokud v případě drobné údržby a oprav není momentový klíč k dispozici, je nutno pečlivě ověřit dosažení požadovaného stavu po montáži.

(2) Při kontrole skutečné velikosti utahovacího momentu je třeba nejdříve přesně označit polohu matice svérkového šroubu nebo hlavy vrtule vůči vhodnému pevnému bodu nebo značce v okolí matice nebo vrtule. Následně se částečně uvolní matice nebo vrtule o cca 1/2 otáčky a pomocí momentového klíče se zatočí zpět do původní polohy. V tomto okamžiku se zaznamená hodnota utahovacího momentu.

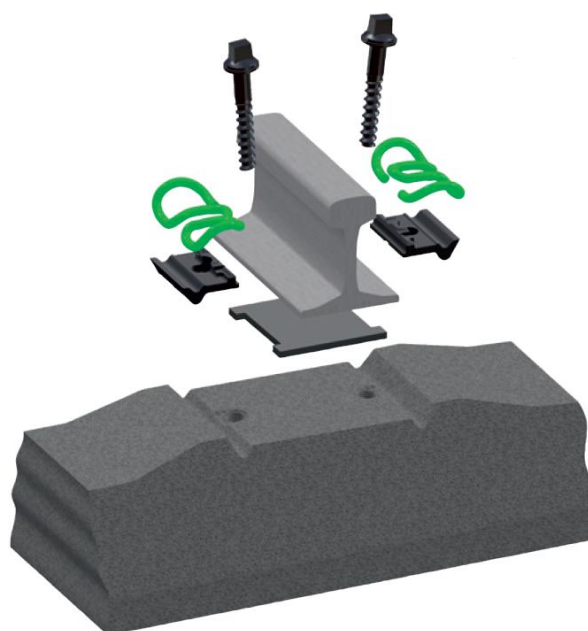
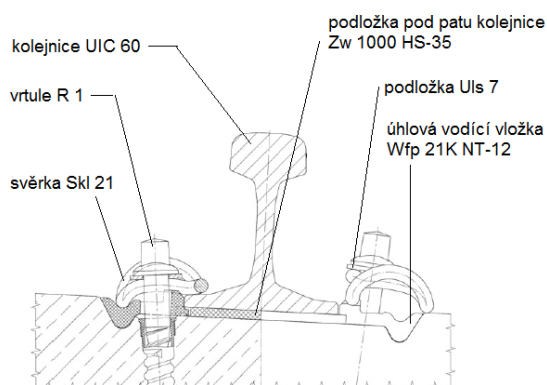
(3) U pružné svěrky Skl 12 se kontroluje správnost montáže plochou měrkou tl. 2,1 mm:

- a) je-li možno měрку vsunout, svěrka je utažena nedostatečně,
- b) není-li možno měрку vsunout, svěrka je dotažena dostatečně.

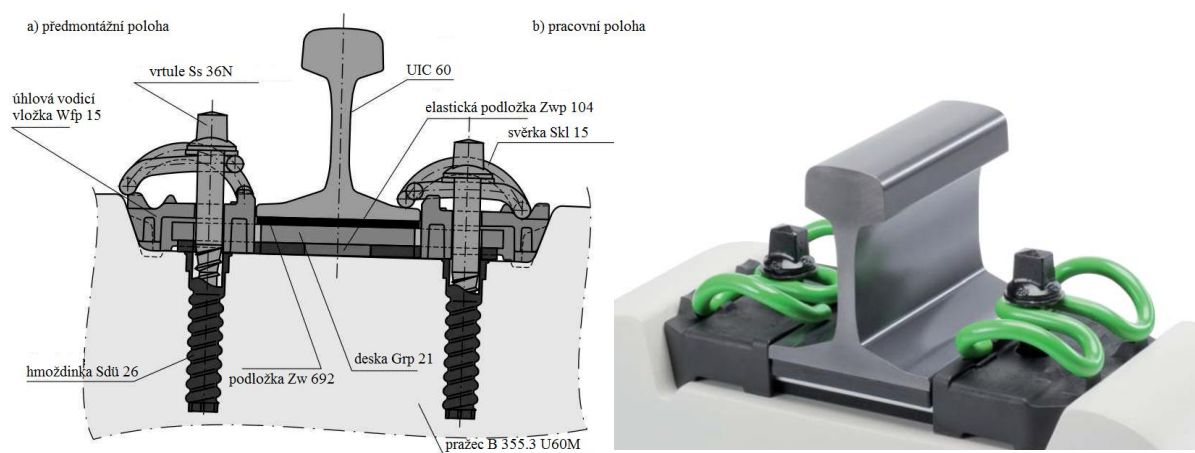
(5) Například MOGUL KORON L.

(9) Značení hmoždinek na pražci dle použitého materiálu a výrobce:

<u>Materiál hmoždinky:</u>	<u>Plastická značka na pražci:</u>	<u>Výrobce:</u>
PE (polyetylén)	3	SK Fotos Žilina
	B	Media Prim Brázdim
PA (polyamid 6)	S	Media Prim Brázdim
PA 30SV (polyamid 6 plněný skelnými vlákny)	1	SK Fotos Žilina
	P	Media Prim Brázdim
	V (pro upevnění W 14)	SK Fotos Žilina
	N (pro upevnění W 14)	ANARI Žilina
Sdü 25 (polyamid plněný skelnými vlákny)	25	Vossloh Fastening Systems
PLASTIRAIL 22.130 (polyamid 6,6 a obal Zn plech)	5	Vape Rail International
PLASTIRAIL 22.115 (polyamid 6,6 a obal Zn plech)	2	Vape Rail International



Obr. 1-20 Upevnění Vossloh W 21NT; zdroj: [32]



Obr. 1-21 Upevnění Vossloh 300; zdroj: [33]

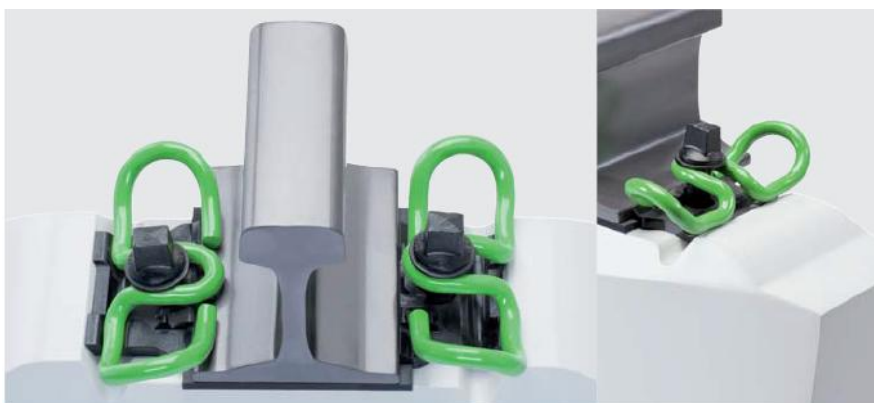
Skladba upevnění:

vrtule R 1 + podložka Uls 7;

pružná svěrka Skl 28;

úhlová vodící vložka
Wfp 21K 700NT;

podložka pod patu kolejnice
Zw 700NT/139/160-60;



Obr. 1-22 Upevnění Vossloh W 28NT; zdroj: [34]

2. Cíle práce

Kapitola 1.2 uvádí normové postupy provozního ověřování systémů upevnění kolejnic. V rámci nich se po dobu ověřování konstrukce ve stanovených intervalech posuzují vybrané veličiny. Tyto veličiny jsou v naprosté většině případů posuzovány buď měřením bez zatížení, příp. pouze na základě vizuální prohlídky. Pod zatížením je možné v rozsahu stanoveném normou prakticky hodnotit pouze rozchod koleje či stav hlavy kolejnice [36]. Podmínkou je dostupnost měřicího vozu pro železniční svršek. Ta je vzhledem ke lhůtám měření na dráze stanoveným vyhláškou č. 177/1995 Sb. velmi omezená.

Důležitou oblast experimentální analýzy představuje hodnocení dynamických a akustických parametrů konstrukcí železničního svršku na základě jejich odezvy na účinky buzení. Tyto parametry jsou zjišťovány nejčastěji v zatíženém stavu. Zatížení je dáno zpravidla reálným vozidlem. Dle charakteru pohybu vozidla rozlišujeme kvazistatické nebo dynamické zatížení. Hodnocení dynamických a akustických účinků na železniční svršek, příp. na jeho jednotlivé části, je možné v zásadě rozdělit na:

- analýzu silového působení a napětí v konstrukci;
- analýzu posunů vyvolaných zatížením konstrukce;
- analýzu šíření vibrací a jejich účinků na okolí trati;
- analýzu šíření hluku a jeho účinky na okolí trati.

Metody dynamické a akustické analýzy lze navíc z hlediska jejich účelu rozčlenit na hygienická, příp. technická měření. Hygienická měření mají za cíl určit míru škodlivosti a vlivu dopravy na životní prostředí. Postupy měření jsou definovány příslušnými technickými normami, hygienické limity pak národní legislativou. Technická měření mají odhalit slabé stránky konkrétní konstrukce. Mají predikovat dlouhodobé chování zkoumané konstrukce za provozu a odhadnout jeho vliv na údržbu a přidružené konstrukce. Metody pro technická určování dynamických a akustických parametrů in situ jsou obecně známy. V konzervativním prostředí železnice však nejsou příliš používány. Neexistuje navíc jejich vzájemná koordinace. Měření bývají obvykle v režii jednotlivých výrobců. Ti si pak často nastavují systém a deskriptory diagnostiky tak, aby získané výsledky byly pro daný výrobek co nejpríznivější. Častým nedostatkem těchto měření bývá také absence uvedení podmínek měření, apod.

Těžištěm dizertační práce je z výše uvedených důvodů studium přenosu dynamických a akustických účinků zatížení kolejovou dopravou do konstrukcí železničního svršku, zejména se zaměřením na systémy upevnění kolejnic. Cíle práce lze shrnout do následujících kroků:

- shrnutí aktuálního stavu teoretických poznatků ohledně dynamických a akustických dějů v koleji (kapitola 3);
- návrh metodiky měření a matematického aparátu k vyhodnocení získaných údajů (kapitoly 4 a 5);
- výběr vhodných lokalit pro měření včetně návrhu metodiky pro určení konkrétního měřicího profilu (kapitola 6);
- realizace měření in situ, příp. in labo (kapitola 7);

- vyhodnocení výsledků případových studií (kapitola 7 a přílohové části A až E);
- poskytnutí výstupů z měření nezávislou organizací správci dráhy, resp. jednotlivým výrobcům a poskytnutí vstupních údajů pro tvorbu a zpřesňování výpočtových modelů (kapitola 7 a přílohové části A až E);
- kompletace vybavení pro uskutečňování laboratorních zkoušek, doplnění aparatury pro měření in situ, doplnění měřicích postupů vyvolaných požadavky technické praxe (kapitola 8);
- optimalizace a zobecnění metodiky měření a vyhodnocení pro širokou oblast použití (kapitola 9);
- doplnění zásad pro zakládání a vyhodnocování zkušebních úseků včetně vytvoření rukověti pro použití jednotlivých systémů upevnění kolejnic (kapitola 9 a přílohová část F);
- vývoj měřicího zařízení pro dlouhodobou instalaci do tělesa tratě s možností zapojení do systému centrálního dohledu diagnostiky závad jedoucích vozidel (kapitola 9).

3. Dynamické a akustické děje v koleji

Dynamické zatížení tratě od kolejové dopravy lze dle svého charakteru a časového průběhu chápat jako zatížení periodické, stochastické a rázové. Účinky takového zatížení se šíří kolejovým roštem, štěrkovým ložem a konstrukčními vrstvami železničního spodku v podobě vibrací do podloží. Tehdy je označujeme jako technickou seismicitu od povrchové nebo podpovrchové železniční dopravy. Část účinků dynamického zatížení je však vyzářena vzduchem v podobě podélného mechanického kmitání. V tomto případě hovoříme o hluku z kolejové dopravy.

3.1 Vozidlo a kolej

Vlastnosti pohybu volného dvojkolí v přímé koleji i obloucích jsou určeny především geometrií dvojkolí a koleje v příčném směru a tvary příčných profilů hlav kolejnic a jízdních obrysů kol – kontaktní geometrie dvojkolí-kolej. Dalšími ovlivňujícími parametry jsou např. konstrukce vedení dvojkolí, hmotnost a rozměry kolejového vozidla, způsob vypružení a tlumení vazeb na vozidle, rychlost jízdy, skluzové charakteristiky a elasticita styku kolo-kolejnice.

Tvar jízdních obrysů kol prodělal dlouhý vývoj od původního válcového tvaru, přes kuželový až k dnes používanému tvaru křivkovému ORE S1002. Kuželovitý tvar kol dvojkolí je velmi důležitý, neboť umožňuje samovolné středění dvojkolí v koleji. To je žádoucí z hlediska jízdních vlastností vozidel v přímé koleji (reakce na příčné odchylky polohy kolejnic v provozu od teoretického směru), vodících vlastností vozidel v oblouku koleje (silové působení mezi kolem a kolejnicí, bezpečnost proti vykolejení) a opotřebení kol i kolejnic [37].

3.1.1 Jízda vozidla v přímé

V případě jízdy železničního vozidla přímou nebo obloukem o velmi velkém poloměru není železniční dvojkolí vedeno žádnou silou. V místech, kde přímá kolej bezprostředně navazuje na směrový oblouk případně v místech výskytu lokálních závad směru koleje, dochází k vychýlení dvojkolí železničního vozidla z centrické polohy. Při takovém vychýlení běží vlivem kuželovitosti oběžné plochy obruče jedno kolo ke kolejnicovému pásu po větším poloměru. Kolo na této straně tedy vykoná ve stejném čase delší dráhu než kolo opačné, což způsobuje natočení dvojkolí. Natočené dvojkolí má následně tendenci přiblížit se k druhému kolejnicovému pásu. Při opakujících se střídavých změnách v rozdílu velikosti poloměrů otáčení kol se volné dvojkolí pohybuje v sinusové křivce s podélnou osou totožnou s osou koleje. Délku sinusové vlny L_K [m] lze pro dvounápravové vozidlo odhadnout pomocí Klingelova vztahu:

$$L_K = 2\pi \sqrt{\frac{r \cdot s}{2 \cdot \gamma}}, \quad (3-1)$$

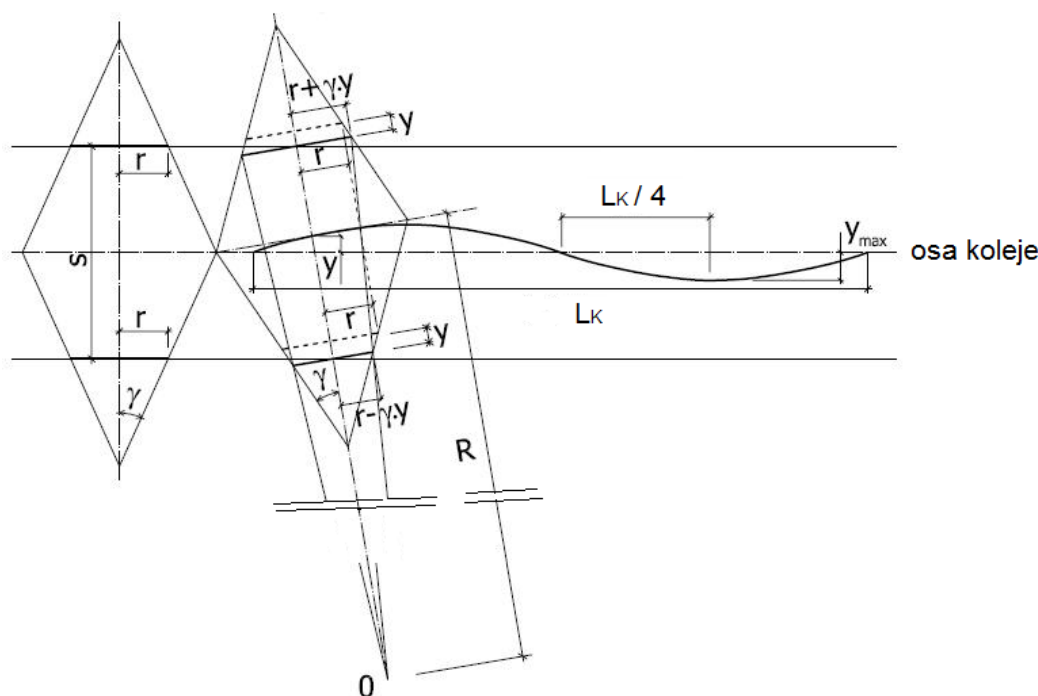
kde r [m] je poloměr kola, s [m] vzdálenost rovin styčných kružnic a γ [–] úkos jízdní plochy – veličina určující vzájemný vztah mezi tvarem a úklonem kolejnice a jízdním obrysem železničního kola. Čím je jízdní plocha méně ukloněná, tím je sinusová vlna delší. Zvyšuje-li se rychlost vlaku, zkracuje se perioda sinusových kmitů. Při dosažení kritické rychlosti nastává rezonance těchto kmitů s vlastním kmitáním vozidla. Zvýšené kmitání vozidla má za následek nárůst dynamických účinků na kolej a při nedostatečném odpružení vozových skříní staršího typu způsobuje nepohodlí pasažérů uvnitř vozu. Frekvenci kmitavého pohybu f_K [Hz] je pak možné vyjádřit jako:

$$f_K = \frac{v}{L_K} \quad (3-2)$$

a maximální příčné zrychlení \ddot{y}_{max} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] jako:

$$\ddot{y}_{max} = 4\pi^2 \cdot y_0 \cdot \frac{v^2}{L_K^2}, \quad (3-3)$$

kde v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je rychlost vozidla a y_0 [m] je maximální příčná odchylka dvojkolí vzhledem k ose koleje. Tato odchylka musí být menší, než polovina vůle mezi rozchodem koleje a rozchodem okolků. Popisovaný sinusový pohyb je znázorněn na obr. 3-1.

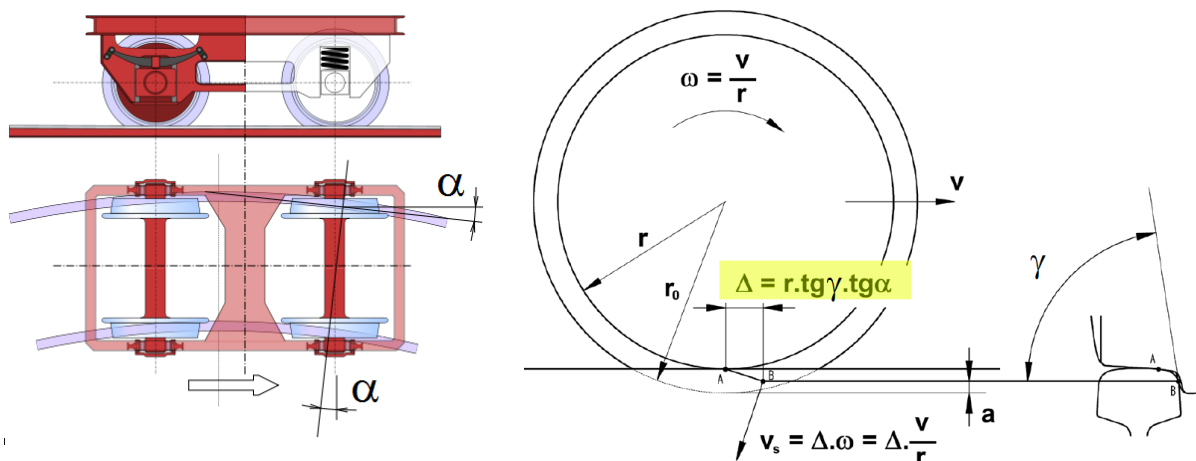


Obr. 3-1 Sinusový pohyb železničního dvojkolí v přímé koleji; zdroj: [38]

V případech, kdy už dvojkolí není schopné dostředění vlivem kuželovitosti jízdního obrysu, začne narážet okolký na pojížděnou plochu kolejnice. V důsledku toho se náhle změní směr jízdy dvojkolí směrem k druhé kolejnici. Tento pohyb se cyklicky opakuje a vede k extrémnímu namáhání kolejového roštu příčnými silami. Pro tento případ je používán odborný termín cik-cak pohyb.

3.1.2 Jízda vozidla v oblouku

Při jízdě obloukem nabíhá kolo s okolkem na kolejnici pod úhlem náběhu α . Stýká se přitom s hlavou kolejnice nejčastěji ve dvou místech. První nosný bod leží na temeni, přenáší se zde svislé zatížení od projíždějící soupravy do kolejového roštu. Druhé místo je předsazené tomuto bodu na vzdálenost Δ . Dochází zde k přenosu příčného zatížení z okolku na bok kolejnicového pásu, o který se okolek opírá. Úhel náběhu má být z hlediska bezpečnosti a plynulosti jízdy co nejmenší.

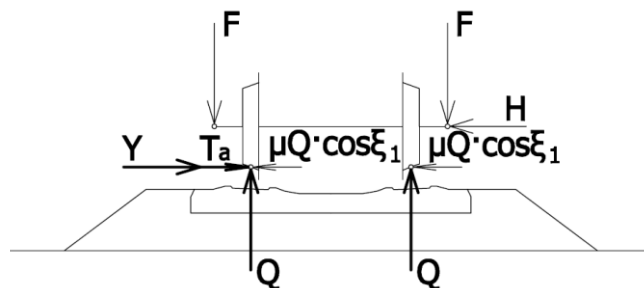


Obr. 3-2 Úhel náběhu α ; předstih Δ druhého nosného bodu; zdroj: [37]

Skutečná poloha kolejového vozidla v oblouku je výsledkem všech sil, které na danou soupravu působí. Těchto sil je velké množství a jejich vzájemné působení má ve své podstatě stochastický charakter. Zanedbáním setrvačných sil daných hmotností dvojkolí a zrychlením v příčném, resp. svislém směru, dostáváme teoretické rozložení sil působících na soustavu dvojkolí-kolej, viz obr. 3-3. Slabě jsou vyznačeny síly, kterými působí dvojkolí na kolej, silně pak odpovídající reakce v kolejovém roštu. Řídící sílu P dostaneme z rovnováhy sil v příčném směru ze superpozice rámové síly H a třecích sil $2 \cdot \mu Q \cdot \cos \xi_1$, resp. z reakcí součtem třecí síly T_a a vodící síly Y . Z uvedeného vyplývá vztah pro výpočet rámové síly H [N]:

$$H = Y - \mu Q \cdot \cos \xi_1, \quad (3-4)$$

kde Q [N] je kolová síla, μ [-] součinitel adheze a ξ_1 úhel, který svírá průvodič ke středu otáčení q_1 s osou podvozku.



Obr. 3-3 Síly působící na dvojkolí a kolej; zdroj: autor

Příčný profil železničního dvojkolí je konstruován se zaoblením tvořícím přechod mezi oběžnou plochou dvojkolí a vnitřní stranou okolku. Zaoblení je provedeno pomocí kruhového oblouku s poloměrem křivosti stejným nebo o něco málo větším než zaoblení na kraji hlavy kolejnicového pásu. Z pohledu roviny příčného řezu může při průjezdu obloukem dojít k dotyku kola a kolejnice v jednom nebo ve dvou bodech. Je-li poloměr zaoblení okolku větší než zaoblení hlavy kolejnice, nastává dotyk v jednom bodě. Vedoucí kolo se při postupu zároveň zvedá, až sklon zaoblení v místě dotyku dosáhne takové velikosti, že sklouzne a nastává ráz. Kolový tlak je přitom přenášen z oběžné plochy do místa zaoblení, kde tak vznikají velké specifické tlaky. Je-li poloměr zaoblení okolku menší než zaoblení kolejnice v přechodu z temene do boku, nastává dotyk ve dvou bodech. Takto vyvolané tlaky na temeno kolejnicového pásu pak vycházejí méně výrazné. K dotyku ve dvou bodech dochází nejčastěji v případě neopotrebených kol a kolejnic, zatímco s dotykem v bodě jednom se nejpravděpodobněji setkáme u kolejnic ve vnějším pásu.

Ke snížení účinků odstředivé síly má být v koleji ve směrovém oblouku projektováno převýšení koleje. Toho se dosáhne nadvýšením polohy vnějšího kolejnicového pásu vůči pásu vnitřnímu. Vnitřní kolejnicový pás tak nadále zůstává v úrovni nivelety temene kolejnicového pásu (vyjma vzestupnice s bodem obratu). Velikost takto projektovaného převýšení je závislá na rychlosti vlakové soupravy V [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$] a na velikosti poloměru oblouku R [m]. Za předpokladu, že všechny vlaky projíždějí konkrétním směrovým obloukem stejnou rychlostí, se projektuje převýšení teoretické. Hodnota teoretického převýšení je taková, že výslednice svislého zrychlení vyvolaného gravitací a odstředivého zrychlení vyvolaného průjezdem vozidla působí kolmo ke spojnici temen kolejnicových pásů. Teoretické převýšení D_{eq} [mm] lze spočítat dle vzorce:

$$D_{eq} = \frac{11,8 \cdot V^2}{R}. \quad (3-5)$$

Ve skutečnosti se však vlaky daným traťovým úsekem stejně rychle nepohybují. Namísto teoretického převýšení se proto povětšinou navrhuje tzv. projektované převýšení koleje D [mm]. Projektované převýšení koleje musí z hlediska nedostatku, resp. přebytku převýšení vyhovět rychlosti všech vlaků v daném úseku trati. Soupravy jedoucí rychlostí:

$$V > \sqrt{\frac{D_{eq} \cdot R}{11,8}} \quad (3-6)$$

projíždějí obloukem s nedostatkem převýšení I [mm], čímž dochází ke zvětšení zatížení vnějšího kolejnicového pásu nárůstem vodící a svislé kolové síly. Oproti tomu soupravy s rychlostí:

$$V < \sqrt{\frac{D_{eq} \cdot R}{11,8}} \quad (3-7)$$

projíždějí obloukem s přebytkem převýšení E [mm], kdy můžeme sledovat zvětšení zatížení vnitřního kolejnicového pásu a to především nárůstem svislé kolové síly. Mezní hodnoty pro nedostatek resp. přebytek převýšení jsou uvedeny v [39].

3.2 Vibrace od kolejové dopravy

Každý dynamický účinek vyvolaný průjezdem vlakové soupravy se elasticky-lineárním prostředím konstrukce železničního svršku šíří jako postupná vlna vzniklá superpozicí množiny sinusových vln. Každý pohyb elementu lze popsat pohybovými rovnicemi, které mají v kartézské – pravoúhlé – soustavě souřadnic tvar [40, 45]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= c_1^2 \frac{\partial \Delta}{\partial x} - 2c_2^2 \left(\frac{\partial \omega_z}{\partial y} - \frac{\partial \omega_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= c_1^2 \frac{\partial \Delta}{\partial y} - 2c_2^2 \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= c_1^2 \frac{\partial \Delta}{\partial z} - 2c_2^2 \left(\frac{\partial \omega_y}{\partial x} - \frac{\partial \omega_x}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (3-8)$$

kde u, v, w jsou složky vektoru posuvu s , Δ je kubická dilatace a $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ jsou složky rotace.

Vnitřní strukturou materiálu konstrukce železničního svršku se vlivem dynamických účinků na styku kolo-kolejnice přenášejí přes kolejový rošt do pražcového podloží rovinné vlny, u kterých rozlišujeme dva základní typy:

- příčná (ekvivolumetrická) vlna;
- podélná (dilatační, nerotační) vlna.

V daném čase mají všechny elementy kontinua ležící v rovině kolmé na směr postupu jednotlivých vln stejné kinematické veličiny. Rovinná vlna vyvolá v prostředí posuv:

$$\begin{aligned}u &= A_1 e^{i \frac{2\pi}{\Lambda} (v_1 x + v_2 y + v_3 z - ct)} \\ v &= A_2 e^{i \frac{2\pi}{\Lambda} (...)} \\ w &= A_3 e^{i \frac{2\pi}{\Lambda} (...)}\end{aligned}\quad (3-9)$$

kde Λ je délka vlny, v_1, v_2, v_3 jsou směrové kosiny roviny, tzv. vlnové normály. Jelikož jsou u, v, w složky vektoru posuvu s , lze po zavedení amplitudy S napsat, že:

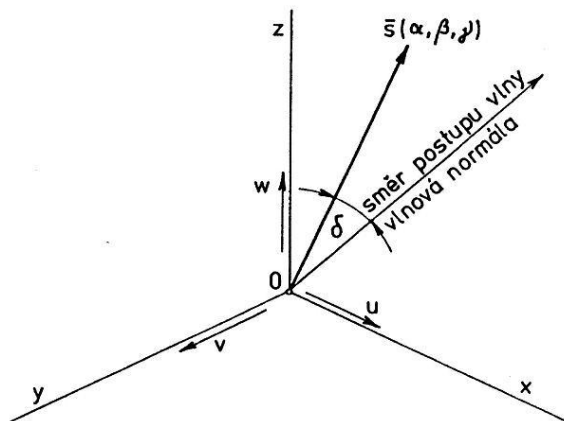
$$\begin{aligned}A_1 &= S \cdot \cos \alpha \\ A_2 &= S \cdot \cos \beta, \\ A_3 &= S \cdot \cos \gamma\end{aligned}\quad (3-10)$$

kde α, β, γ jsou směrové úhly vektoru posuvu. Vztahy (3-10) musí splňovat soustavu pohybových rovnic (3-8). Po úpravě dostaneme:

$$\begin{aligned}(G - \rho c^2) \cos \alpha + (\lambda + G) v_1 \cos \delta &= 0 \\ (G - \rho c^2) \cos \beta + (\lambda + G) v_2 \cos \delta &= 0, \\ (G - \rho c^2) \cos \gamma + (\lambda + G) v_3 \cos \delta &= 0\end{aligned}\quad (3-11)$$

kde λ a G jsou Laméovy konstanty a:

$$\cos \delta = \nu_1 \cdot \cos \alpha + \nu_2 \cdot \cos \beta + \nu_3 \cdot \cos \gamma. \quad (3-12)$$



Obr. 3-4 Vlnová normála a vektor posuvu s ; zdroj: [40]

Homogenní soustava rovnic (3-11) pro neznámé $\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$ poskytne jako anulovaný determinant rovnici:

$$(G - \rho c^2)^2 \cdot [(G - \rho c^2) + (\lambda + G)] = 0. \quad (3-13)$$

Kubická rovnice (3-13) má jen dva různé kořeny (3-14) a (3-15).

Vektor posuvu s příčné vlny stojí kolmo k vlnové normále a její rychlost šíření c_2 je vyjádřena vztahem:

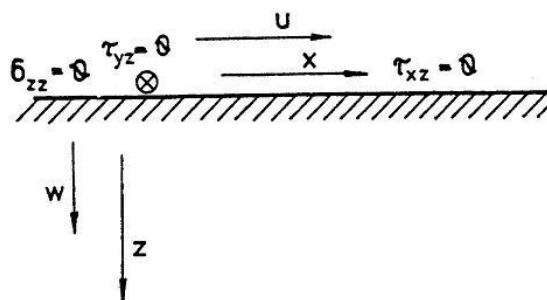
$$c = c_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \text{ dvojnásobný kořen.} \quad (3-14)$$

Vektor posuvu s vlny dilatační se svým směrem shoduje se směrem vlnové normály. Rychlost šíření podélné vlny c_1 lze definovat rovnicí:

$$c = c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}, \quad (3-15)$$

Tyto zmiňované rychlosti vlnění nejsou vzhledem k relativní izotropii materiálu závislé na směru postupu vlny. Ve skutečnosti však bude rychlost šíření podélné vlny c_0 kolejnicovým upevněním o něco menší. Je to dáno větší tuhostí neomezeného prostředí, z něhož jsou výše uvedené vztahy odvozeny, oproti skutečné struktuře železniční tratě.

Povrchovými strukturami prvků železničního svršku se účinky od dynamického namáhání tratě přenášejí v podobě Rayleighových vln. Amplituda Rayleighových vln klesá exponenciálně s hloubkou pod povrchem. Tyto vlny vyvolávají ve struktuře materiálu rovinné přetvoření. Jejich amplituda leží v rovině dané směrem postupu vlny a normálou k povrchu upevnění. Posuvy elementů kolmé k této rovině amplitud jsou nulové.



Obr. 3-5 Orientace soustavy souřadnic pro Rayleighovy vlny; zdroj: [40]

Soustava souřadnic je orientována podle obr. 3-5. Kladný smysl osy z míří do nitra struktury jednotlivých komponentů tratě. Posuvy ve směru souřadnic y jsou nulové. Na povrchu struktury je stále nulové napětí a proto je možné napsat:

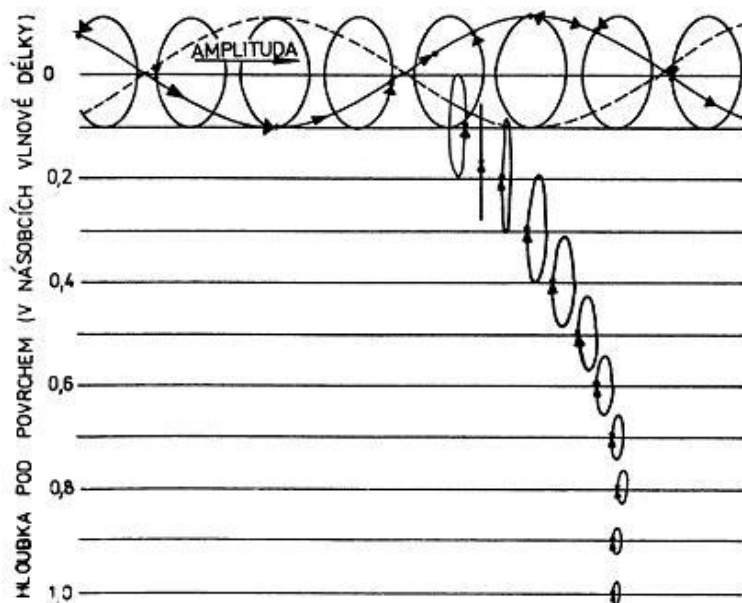
$$\begin{aligned}\sigma_{zz} &= \left(\lambda \Delta + 2G \frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=0} = 0 \\ \tau_{xz} &= G \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)_{z=0} = 0 \\ \tau_{yz} &= G \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=0} = 0\end{aligned}\quad (3-16)$$

Další okrajová podmínka nám říká, že pro $z \rightarrow \infty$ je $u = w = 0$. Rychlost Rayleighových vln c_R je pak dána vztahem:

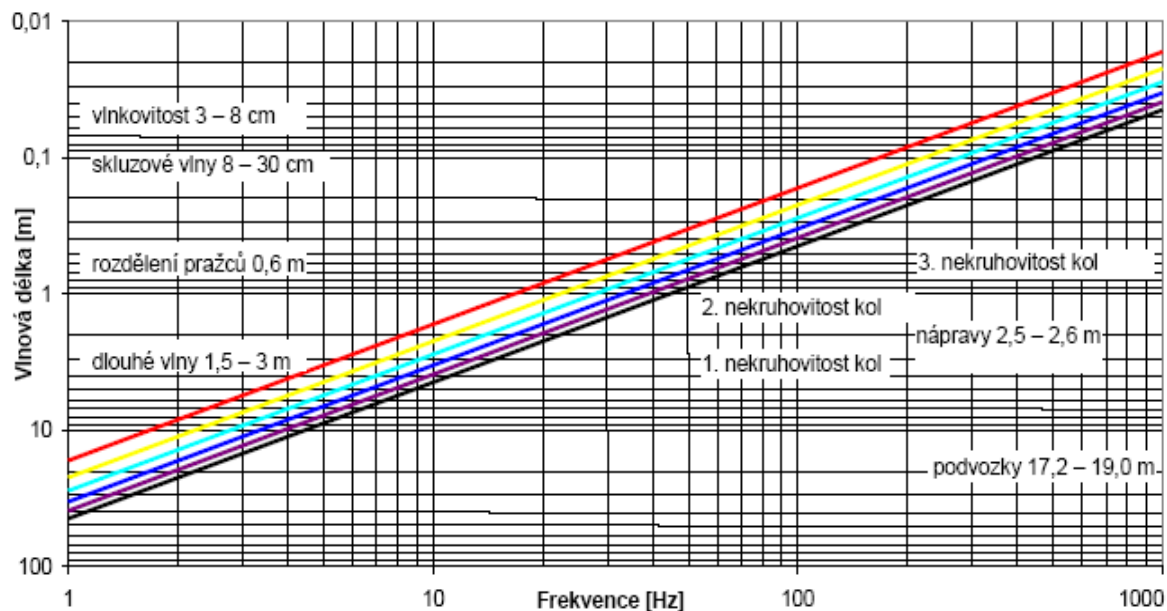
$$\left(\frac{c_R^2}{c_2^2} \right)^3 - 8 \left(\frac{c_R^2}{c_2^2} \right)^2 + \frac{8(2-\mu)}{1-\mu} \left(\frac{c_R^2}{c_2^2} \right) - \left(\frac{8}{1-\mu} \right) = 0. \quad (3-17)$$

Rychlost Rayleighových vln je nezávislá na vlnové délce, viz obr. 3-6. Poměr rychlostí c_R / c_2 je funkcí pouze Poissonova čísla μ . Rayleighovy vlny lze interpretovat jako pohyb myšleného bodu po elipse, která se pohybuje stálou rychlostí c_R rovnoběžně s povrchem. Poměr poloos této elipsy se mění s hloubkou z pod povrchem. Tím se mění také smysl oběhu myšleného bodu. Vodorovné posuvy elementů velmi rychle klesají s rostoucí hloubkou pod povrchem – Rayleighovy vlny tak mají charakter povrchových vln. Vlny vysokých frekvencí – malých vlnových délek – ztrácejí amplitudy posuvů rychleji v závislosti na hloubce z , z čehož plyne, že u takovýchto vln se energie jimi nesená transportuje v tenké zóně u povrchu jednotlivých komponentů železničního svršku – skin efekt.

Z hlediska vlnových délek a frekvencí je obecně přijímána hypotéza dle [44], viz obr. 3-7.



Obr. 3-6 Závislost amplitudy Rayleighových vln na hloubce pod povrchem; zdroj: [40]



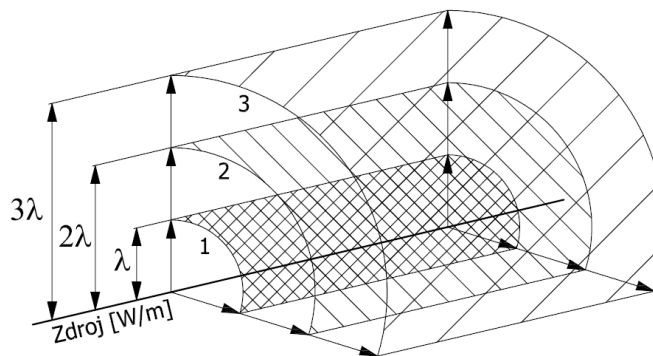
$$\lambda = \frac{v}{f}; \quad f = \frac{v}{\lambda}$$

— 60 — 80 — 100 — 120 — 140 — 160 Rychlost pojezdu vlaku [km/h]

Obr. 3-7 Zdroje vibrací z hlediska vlnové délky a frekvence; zdroj: [11]

3.3 Hluk od kolejové dopravy

Dle teorie akustiky lze nahlížet na hnací jednotku v klidu či pohybu jako na bodový zdroj hluku. Ve speciálních případech (pomalá jízda soupravy, lokomotivní vlak, sestava vozů s plochými koly atd.) lze vnímat pohybující se vozidlo jako řadu bodových zdrojů. Nejčastěji se však vlak bude chovat jako přímkový zdroj omezené délky vyzařující do svého okolí akustické vlny. Tyto vlny mají tvar souosých válců, viz obr. 3-8.



Obr. 3-8 Šíření válcové vlny od jedoucího kolejového vozidla; zdroj: [40]

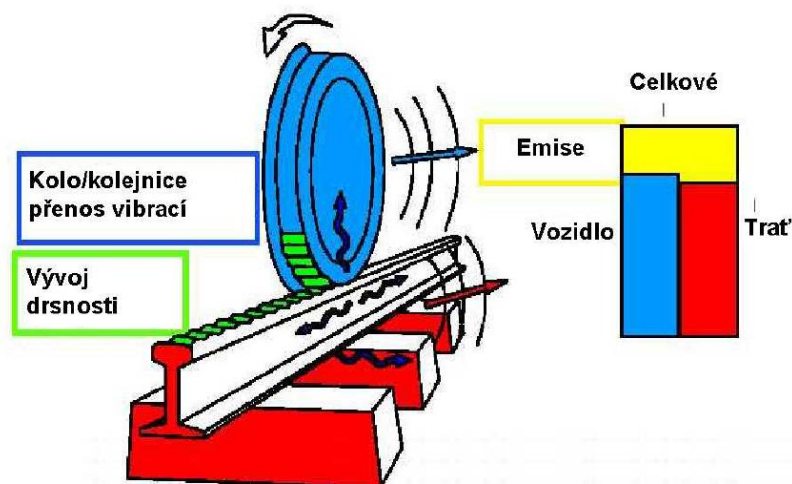
Hluk způsobený železniční dopravou lze obecně rozdělit do čtyř skupin [42, 43, 45]:

- hluk hnacího vozidla;
- hluk vznikající na styku kolo – kolejnice (hluk valivý, kvílivý, impaktní);
- aerodynamický hluk a hluk na styku trakčního sběrače s trolejovým vedením;
- ostatní lokální hluky vznikající v důsledku provozování kolejové dopravy (hluk z brzdění a kolejových brzd, hluk z akustických informačních a orientačních systémů, hluk zabezpečovacího zařízení apod.).

Hnací jednotka je výrazným zdrojem hluku. Mezi hlavní zdroje hluku patří u elektrických vozidel trakční motor, zařízení přenosu výkonu, ventilátory trakčních motorů a další elektrická zařízení. U vozidel s nezávislou trakcí pak zejména motor včetně turbodmychadla, ventilátory chladicího systému, výfuk motoru, zařízení pro přenos výkonu a další pomocná zařízení. Při srovnání obou typů trakcí vychází díky vhodnějšímu frekvenčnímu složení a nižším hladinám hluku podstatně lépe trakce elektrická. Hluk trakčních motorů je dominantní při rychlostech do cca $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a s rychlostí se téměř nemění, protože úroveň akustických emisí vyvolaných především dieselovými motory jsou závislé více na okamžitých otáčkách motoru než na jízdní rychlosti vlaku.

S vývojem moderních elektrických jednotek se hluk od hnací jednotky dostává do pozadí zájmu. Dominantní zdroje hluku se posunují blíže ke kolejovému roštu a převládá tak hluk vznikající na kontaktu kolo-kolejnice. V rozsahu rychlostí cca 60 až $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, tj. ve středním rychlostním pásmu, a tedy i ve velké většině posuzovaných případů, je dominantní valivý hluk. Valivý hluk vzniká vzájemnou interakcí imperfekcí na pojížděném povrchu kola, resp. kolejnice. Drsnost kolejnice je zde významným ovlivňujícím činitelem akustického příspěvku trati stejně tak, jako např. tuhost uložení kolejnic. Je proto účelné udržovat povrch hlavy kolejnice co nejhladší. Princip vzniku zvýšené drsnosti povrchu kolejnice až do vzniku vlnovitosti ještě není plně prozkoumán. Nepochybně však k němu

dochází tam, kde se vlakové soupravy rozjíždějí nebo brzdí, anebo v blízkosti výhybek a kolejových křižovatek, příp. ve složitých směrových poměrech trati. Dalším klíčovým přispěvatelem pro hluk valení je drsnost oběžných ploch dvojkolí. Zde je hlavní příčinou zvyšování drsnosti brzda s klasickým brzdovým špalíkem z šedé litiny. V celkových hlukových emisích je trať dominantní téměř ve všech případech ve frekvenčním pásmu do 1500 Hz. Mechanismus vzniku valivého hluku je patrný z obr. 3-9.



Obr. 3-9 Mechanismus vzniku valivého hluku; zdroj: [43]

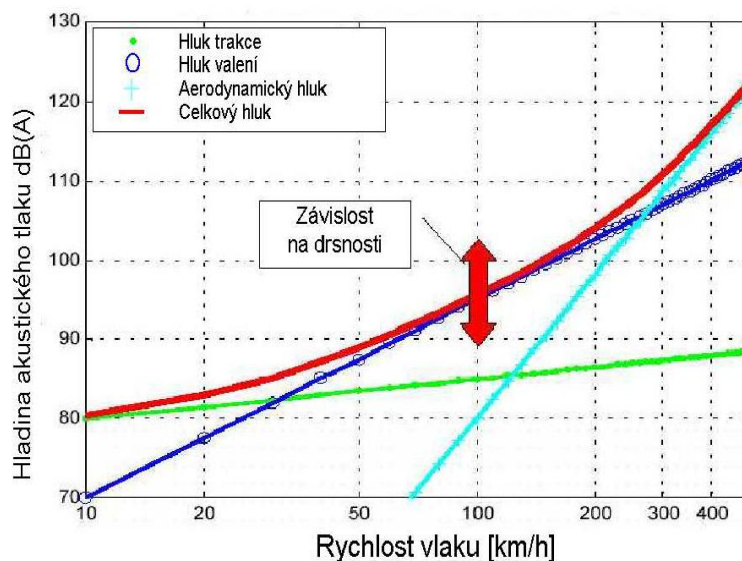
Další podskupinou hluku na kontaktu kolo-kolejnice je hluk impaktní. Impaktní hluk je rytmický hluk způsobovaný nejčastěji přechodem dvojkolí přes kolejnicové styky, srdcovkové části výhybek nebo propadlé svary. Na okamžik zde dochází ke ztrátě kontaktu kola s kolejnicovým pásem, přičemž opětovné najetí na následující kolejnici je doprovázené nárazem. Někdy se za impaktní hluk považuje i hluk, jenž vzniká vlivem nerovností většího charakteru na kole či kolejnici.

Poslední podskupinu tvoří hluk kvílivý. Jedná se o tónový hluk o vysoké amplitudě vznikající při průjezdu vlakové soupravy oblouky malých poloměrů. Elastické kroucení osy dvojkolí je mírně redukováno podélným prokluzem kol. Tato kroucí deformace ve spojitosti s podélným prokluzem probíhá do té doby, než je překročena třecí síla. Poté se dvojkolí dostává do smykového pohybu, čímž se osa dvojkolí vyrovnává do původního stavu. Střídání sil způsobujících prokluz a smyk působí na každé kolo v opačném směru. Za určitých podmínek režimu střídání přímočarého prokluzu a příčného smyku dvojkolí rezonuje. Tyto vibrace pak budí akustické vlny tvořící kvílivý hluk.

Aerodynamický hluk a hluk vznikající na styku trakčního sběrače s trolejovým vedením nabývá na důležitosti při rychlostech vyšších než $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Významnými zdroji hluku při vysokých rychlostech je pantograf, nekapotované podvozky a turbulence při nedostatečně aerodynamickém tvaru vozidla. Vzhledem k absenci vysokorychlostních tratí je tento zdroj hluku v České republice prozatím v pozadí zájmu.

Hlukové emise jsou ovlivňovány celou řadou faktorů, především pak způsobem vedení trasy, druhem trakce, rychlostí vlaků, konstrukcí a technickým stavem železničního svršku a vozidel a intenzitou provozu. Dále je pak šíření hluku závislé na klimatických podmínkách, konfiguraci okolního terénu a druhu jeho povrchu. Významným faktorem určujícím

převažující typ hluku je právě rychlost. Zdroje hlukových emisí a jejich podíl na celkovém hluku v závislosti na jízdní rychlosti jsou znázorněny na obr. 3-10. Zdroje a vlastnosti hluku od železniční dopravy jsou v různých výškových úrovních odlišné, jak je ukázáno na obr. 3-11.



Obr. 3-10 Vliv jízdní rychlosti na celkové akustické emise; zdroj: [43]



Obr. 3-11 Vliv jízdní rychlosti na celkové akustické emise; zdroj: autor

3.4 Charakteristika kolejového roštu

Schopnost tlumit dynamické účinky projíždějící vlakové soupravy zastává na kolejovém roštu především systém pružného kolejnicového upevnění, resp. pryžová podložka umístěná pod patu kolejnice, příp. i penefolová nebo polyetylenová umístěná pod podkladnicí. Zásadní charakteristikou těchto pryžových podložek je bezesporu jejich statická a dynamická tuhost.

Statická tuhost upevnění (pérová konstanta) k [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$] je přímo definována jako poměr mezi zatížením F a poklesem kolejnice vůči podkladu z , jež jsou funkcí času t :

$$k = \frac{F(t)}{z(t)} . \quad (3-18)$$

Je ovšem známo, že celý systém od železničního svršku až po podloží vykazuje nelineární chování a významný vliv na správné stanovení tuhosti má rovněž kontakt mezi pražcem a kolejovým ložem. V těchto případech je určení statické tuhosti výrazně složitější a do popředí zájmu se tak dostává dynamická tuhost, na jejímž základě lze určit, jak mechanický systém deformačně reaguje na časově proměnný průběh vstupujícího silového působení. Postupy pro praktické zjišťování a hodnocení tuhosti upevnění kolejnic jsou uvedeny v Obecných technických podmínkách Českých drah pro upevnění kolejnic, resp. pro jeho dílčí prvky (pružné svěrky a spony, pružné podložky) a v normě ČSN EN 13146-9+A1. Přestože tyto dokumenty uvádějí odlišné postupy, lze zjišťování tuhosti podložek nebo celých sestav upevnění obecně rozdělit na:

- statické zkoušení;
- nízkofrekvenční dynamické zkoušení při frekvenci zatěžování $3 \div 10$ Hz;
- vysokofrekvenční dynamické zkoušení při frekvenci zatěžování $20 \div 450$ Hz.

Měkké podložky mohou poměrně významně snížit velikost vybuzeých vibrací, šířících se z kolejnicových pásů přes upevnění do pražců a pražcového podloží. Tím je zajištěna ochrana šterkového lože před nadměrnými vibracemi, jež by mohli vést k degradaci geometrických parametrů koleje, příp. k degradaci pražcového podloží. V literatuře se uvádí průměrné zeslabení vibrací kolem 5 dB mírně se zvyšující v oblasti kolem 20 Hz až na 10 dB [42]. Také je však nutné podotknout, že příliš měkké podložky mají za následek vyšší hladiny venkovního hluku a hluku šířícího se zemí (vibrace v pásmu $30 \div 200$ Hz, které způsobují zpětně vyzářený hluk v budovách).

Tlumení způsobuje přeměnu mechanické energie při vibracích struktury na jiné formy energií – především na teplo. Tento děj je nevratný. Strukturální tlumení dosahuje nejvýraznějšího efektu při rezonanci systému nebo v jeho blízkém okolí. Při buzení se budící silou dodává do konstrukce energie, čímž narůstá amplituda kmitavého pohybu až na hodnotu, při které dochází k rovnováze mezi energií dodávanou a energií disipovanou (ztracenou). Útlum chvění D v konstrukci upevnění kolejnic je vyjádřen základním vztahem [41]:

$$D = 10 \log \frac{(Z_{M1} + Z_{M2})^2}{4 \cdot Z_{M1} \cdot Z_{M2}} . \quad (3-19)$$

Z uvedeného vyplývá, že čím větší bude rozdíl mechanických impedancí Z_{M1} a Z_{M2} v určitém místě konstrukce upevnění (přechod mezi kolejnicí a podložkou, resp. mezi podložkou a pražcem), tím dojde k většímu útlumu chvění. Naopak při rovnosti impedancí $Z_{M1} = Z_{M2}$ bude útlum nulový.

Konstrukční materiál	Impedance Z_M [$\text{Ns}\cdot\text{m}^{-3}$]
Ocel	$4,5\cdot 10^7$
Beton	$7,1\cdot 10^6$
Dřevo bukové	$2,5\cdot 10^6$
Pryž měkká	$6,3\cdot 10^4$
Pryž tvrdá	$1,5\cdot 10^6$

Tab. 3-1 Příklady hodnot mechanických impedancí materiálů používaných v konstrukcích železničního svršku; zdroj: [41]

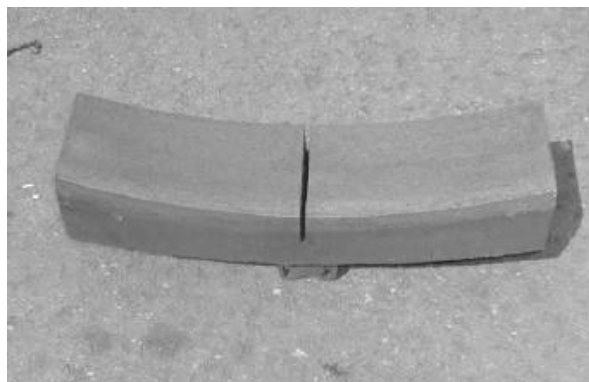
3.5 Protivibrační a protihluková opatření

V zájmu omezení šíření hluku a vibrací se uplatňují četná ochranná opatření. Snížení vlivu hluku a vibrací na okolí je možno provést buď omezením či odstraněním zdroje hluku a vibrací nebo zvýšením odporu prostředí, ve kterém se akustické a vibrační vlny šíří. Některá opatření se již v provozu dobře osvědčila, jiná se zkouší, upravují a vylepšují. Je třeba podotknout, že omezení nebo snížení nežádoucích emisí je nejúčinnější u zdroje. Pro návrh, následnou výrobu a aplikaci ochranných opatření, která omezí zdroje hluku a vibrací a jejich šíření do okolí, je důležité určení jak hlavních zdrojů hluku a vibrací, tak i cest, kudy se šíří. Zásadního významu zde nabývá reálné a správné měření veličin charakterizujících hluk a vibrace, jejich analýza a případné modelování. Nutnost souladu těchto tří oblastí je zřetelná.

Protihluková a protivibrační opatření lze rozdělit dle oblasti použití na [23, 43, 46, 47]:

- opatření aplikovaná na vozidla;
- opatření aplikovaná na trať;
- opatření aplikovaná mezi příjemcem expozice a tratí.

Mezi protihluková a současně protivibrační opatření aplikovaná na vozidla patří zejména protihlukové absorbéry různého principu, případně stínící kryty a vhodným způsobem optimalizované tvary kola a jejich materiál, příp. použití nekovových brzdových špalíků. Účinnost těchto opatření je různá, obecně lze říci, že se hodnota útlumu hluku pohybuje od cca 2 dB do 5 dB. Záleží na konstrukci provedení, použitých materiálech, provozních podmínkách apod.



Obr. 3-12 Příklady opatření aplikovaných na vozidla; vlevo kolový absorbér firmy Bonatrans (v popředí) a firmy Schray&Veit (v pozadí); vpravo nekovový brzdový špalík typu L Ferodo 3325; zdroj: [43, 48]

Do protihlukových opatření aplikovaných na trať je možné zařadit zejména kolejnicové akustické absorbéry (bokovnice), kolejnicové podložky či různé systémy kolejnicových mazníků. V literatuře se uvádí útlum hluku v rozmezí od 2 dB do 4 dB. Dalším účinným opatřením je akustické broušení pojízdné hrany kolejnicových pásů, které má za následek snížení akustické drsnosti trati. Zde je vhodné podotknout, že v současné době bývá akustické broušení prováděné po závěrečném propracování koleje běžnou součástí investičních akcí v České republice.



Obr. 3-13 Příklady protihlukových opatření aplikovaných na trať; vlevo kolejnicový absorbér BRENS ABSORBER BA; vpravo mechanický kolejnicový mazník LC50; zdroj: autor

Za protivibrační opatření aplikovaná na trať lze označit použití měkkých podložek pod patu kolejnice či speciálních pružných upevnění kolejnic. Dále do této skupiny patří např. pražce s odpruženou ložnou plochou nebo pražce s vnitřním tlumením, plastové pražce, podšterkové rohože, speciální panelové a plovoucí panelové tratě či konstrukce s průběžně podepřenými kolejnicemi. Útlum vibrací se pak díky těmto opatřením pohybuje na vybraných frekvencích v rozmezí 2 dB až 20 dB.



Obr. 3-14 Příklady protivibračních opatření aplikovaných na trať; vlevo podšterková rohož aplikovaná u DB; vpravo rámový pražec vyvinutý pro ÖBB; zdroj: [23]

Mezi protihluková opatření aplikovaná mezi příjemcem hlukové expozice a tratí spadají především různá stavební opatření. Mezi nejčastěji používanými lze jmenovat různé typy protihlukových stěn nebo individuální protihluková opatření na exponovaných objektech, tj. např. výměna oken apod. Účinnost těchto opatření je relativně vysoká, jedná se však většinou o finančně náročná díla. Dosažitelné snížení hladiny akustického tlaku silně závisí na výškové poloze zástavby, kterou chceme chránit, ve vztahu ke koleji. Může se tedy pohybovat v poměrně velkém rozsahu, od 6 dB do cca 15 dB. Protihlukové bariéry se umísťují do vzdálenosti 4 m až 4,5 m od osy přilehlé koleje. Jejich výška se běžně pohybuje od 2 m do 4 m. Vyšší bariéry jsou z důvodů bezpečnosti provozu na trati i jejich estetickému dopadu na okolí nežádoucí. K velmi zajímavým opatřením snižujícím úroveň hluku v okolí tratí patří tzv. nízké protihlukové stěny, jinak také nazývané jako nízké protihlukové clony.



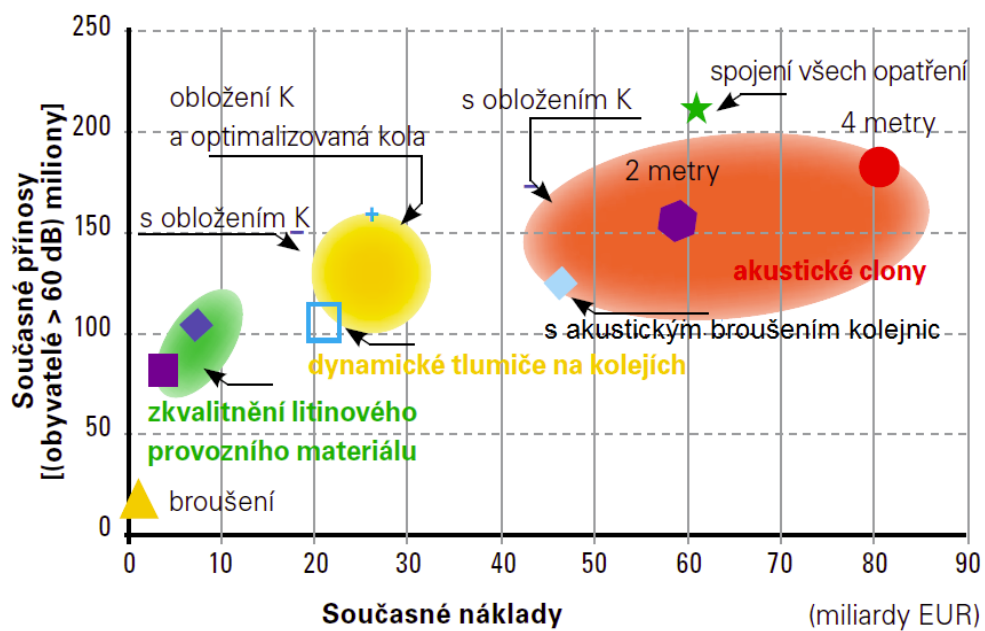
Obr. 3-15 Příklady protihlukových opatření aplikovaných mezi příjemcem a tratí; vlevo oboustranná protihluková stěna; vpravo nízká protihluková clona BRENS BARRIER; zdroj: autor

K protivibračním opatřením aplikovaným mezi příjemce expozice a tratí lze zahrnout různé úpravy podloží, jako jsou vlnové impedanční bloky, ztužení půdy, podzemní stěny a příkopy či protivibrační izolace budov. Účinnost těchto opatření pak zpravidla nepřesahuje 10 dB.



Obr. 3-16 Příklady protivibračních opatření aplikovaných mezi příjemcem a tratí; podzemní stěna zhotovená tryskovou injektáží ve Španělsku; zdroj: [49]

Jedním z nejvýznamnějších projektů poslední doby zaměřených na zhodnocení efektivnosti různých protihlukových opatření byl projekt STAIRRS – Strategy and Tools to Assess and Implement Noise Reduction Measures for Railway Systems [50]. Na obr. 3-17 jsou zachyceny hlavní výsledky projektu STAIRRS, ze kterých vyplývá, že používáním kompozitního brzdového obložení kolejových vozidel se ušetří nemalé finanční prostředky ve srovnání se zhruba stejně efektivním řešením prostřednictvím protihlukových stěn. Neméně důležitým poznatkem je fakt, že nejúčinnější je vždy kombinace různých protihlukových opatření.



Obr. 3-17 Výsledky projektu STAIRRS; zdroj: [50]

4. Metodika měření

Technická měření dynamických a akustických parametrů konstrukcí železničního svršku je možné rozčlenit do čtyř základních skupin, jak již bylo uvedeno v kapitole 2. Tato měření lze provádět jednak laboratorně a jednak in-situ. Největšími výhodami laboratorních měření je možnost zajištění referenčních podmínek pro různé měřicí kampaně, snadnější příprava a organizace během měření a dobrá opakovatelnost měření. Nevýhodou je potom skutečnost, že daná měření neodpovídají zcela přesně reálným podmínkám a že lze jen velmi těžko simulovat skutečné dopravní zatížení. U měření in-situ jsou výhody a nevýhody převážně opačné. Z uvedeného tedy vyplývá, že laboratorní zkoušky je výrazně jednodušší standardizovat.

Uskutečněná laboratorní měření měla za cíl především porovnat mezi sebou jednotlivé testované konstrukce upevnění kolejnic, zjistit významné frekvence příp. rezonanční pásma a určit útlumy na těchto frekvencích. Měření in-situ pak měla prokázat chování sledovaných konstrukcí v reálných podmínkách při zatížení železniční dopravou a určit způsoby, kterými se dynamické a akustické účinky projevují. Současně měla posloužit ke srovnání s výsledky z laboratoře. Jedině na základě takovýchto znalostí bude možné stanovit vhodná konstrukční opatření vedoucí k omezení negativních vlivů železniční dopravy a určit vhodné způsoby monitoringu a údržby.

Ústav železničních konstrukcí a staveb (dále jen ÚŽKS) se již několik let zabývá měřeními dynamicko-akustických účinků na kolejových konstrukcích. Jedná se o měření prováděná v rámci bakalářských, diplomových i vědeckých prací ÚŽKS, ale také v rámci spolupráce s ostatními katedrami a soukromými subjekty. Většina měření je realizována za plného provozu v trati [30, 51, 53], ale existují i příklady z laboratoře [52, 53]. Ze zajímavých mezinárodních projektů z poslední doby zabývajících se danou problematikou lze uvést projekty INNOTRACK – Innovative Track Systems [54], RIVAS – Railway Induced Vibration Abatement Solution Collaborative Project [55] nebo QCITY – Quiet City Transport [56].

Výše uvedené práce sloužily k inspiraci pro návrh metodiky měření včetně výběru vhodných měřicích pomůcek a zařízení. Vstupními požadavky bylo, aby výsledná metodika měření:

- byla dostatečně komplexní pro vyšetření všech očekávaných stěžejních dějů v konstrukci a umožňovala jejich snadnou interpretaci;
- umožňovala univerzální použití pro různé konstrukční systémy;
- umožňovala snadnou instalaci v trati bez omezování provozu;
- zajistila bezpečnost provozu a práce měřické skupiny;
- byla neinvazivní vůči vyšetřované konstrukci;
- umožňovala dostatečnou přesnost, opakovatelnost a reprodukovatelnost měření.

Mezi dodatečné požadavky na měření in-situ patřilo, aby zvolená metodika měření umožnila přípravu, vlastní měření a vyklizení měřicího stanoviště během 7,5 hodinové

pracovní doby. Tento požadavek byl vyvolán potřebou zajistit střežení daného stanoviště drážním zaměstnancem na základě požadavku správce dráhy.

4.1 Laboratorní měření

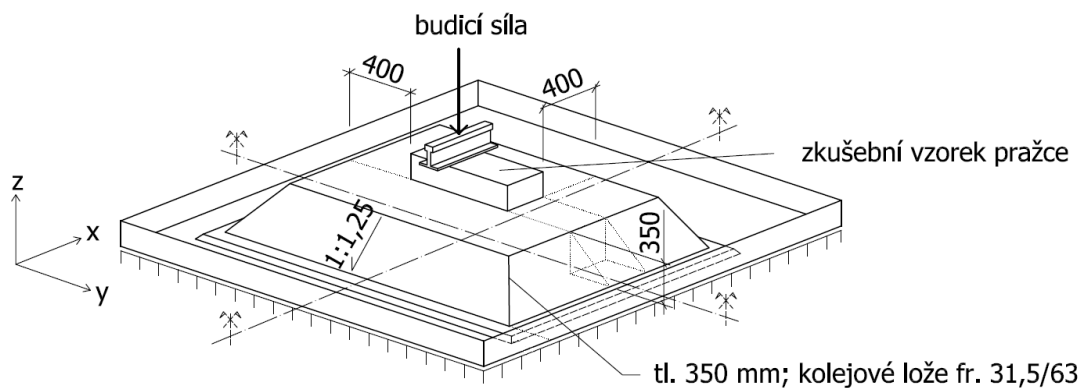
Aby bylo možno interpretovat neznámé chování mechanické soustavy představující zatíženou železniční trať, je zapotřebí v rámci měření vybudit tuto soustavu také známými budicími účinky. Vhodným budicím prostředkem je v těchto případech mechanický ráz vyvolaný speciálním rázovým kladivem, příp. jiným typem řízeného budiče. Rázy mohou libovolnou mechanickou soustavu vybudit do rezonančních kmitů díky tomu, že spektrum rázu je spojitě a obsahuje složky všech důležitých kmitočtů.

Procesy aplikované na testované součásti nebo struktury s cílem získat matematický popis jejich dynamického chování se obecně nazývají modálními zkouškami [60]. Cílem zkoušek prováděných pomocí modálního kladiva v jednotlivých měřicích kampaních (tzv. impact testing) je zjištění modálních parametrů kolejového roštu v oblasti upevnění kolejnic. Těmito parametry jsou vlastní frekvence, vlastní tvary kmitů a modální tlumení. Při zkoumání dynamických účinků buzení mechanické soustavy metodou experimentální modální analýzy je nezbytné předpokládat technickou linearitu vyšetřovaného systému, tzn., že odezva systému je pokud možno přímo úměrná odpovídajícímu buzení. I když v praxi nikdy nepracujeme se systémy čistě lineárními, při provádění modální analýzy uvažujeme nejlepší možnou lineární aproximaci systémové odezvy.

Laboratorní práce byly vzhledem k výše vytyčeným cílům zaměřeny čistě na vibrodiagnostiku, tedy měření veličin prostřednictvím snímačů zrychlení vibrací.

4.1.1 Zkušební místo

Jako zkušební vzorek byla použita část pražce s uzlem upevnění. Pražec byl uložen do šterkového lože tvaru komolého jehlanu, které bylo zřízeno ve zkušební vaně o rozměrech 2,0 x 2,0 m. Rozměry a tvar vzorku jsou zachyceny na obr. 4-1. Zkušební vana byla od základové desky odizolována mezivrstvou z korku. Laboratorní zkoušky byly prováděny v laboratoři ÚŽKS. Alternativním místem k provádění zkoušek v roce 2015 se po odtěžení šterkového lože z laboratorních prostor stalo kolejové pole umístěné v areálu Fakulty stavební VUT v Brně, viz obr. 4-2. Tloušťku, ulehlost a stupeň zhutnění podkladní vrstvy šterku (kolejového lože) lze ve vnitřních i venkovních podmínkách provádění zkoušky považovat za srovnatelné. Při jejich zřizování nebyla použita žádná podbíjecí ani hutnící mechanizace.



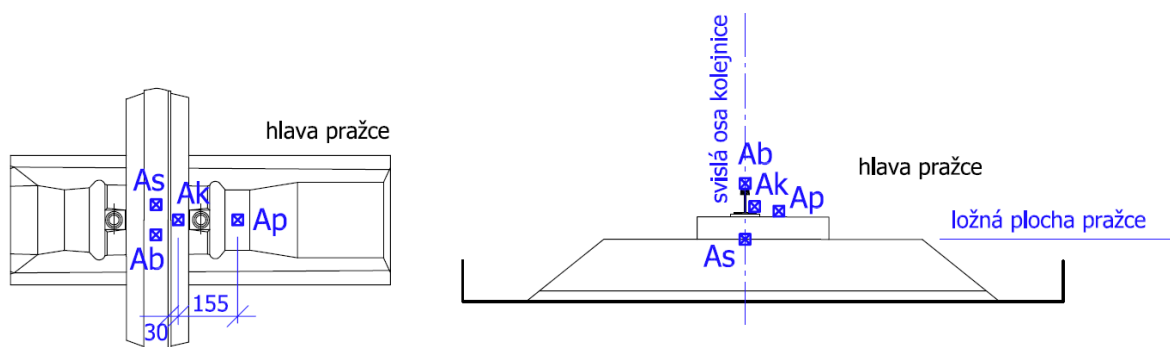
Obr. 4-1 Zkušební vzorek železničního svršku v laboratoři ÚŽKS; zdroj: autor



Obr. 4-2 Zkušební vzorek železničního svršku na kolejovém poli v areálu Fakulty stavební VUT v Brně; zdroj: autor

4.1.2 Uspořádání měření

Laboratorní vzorky kolejového roštu byly osazeny snímači dle obr. 4-3 a tab. 4-1. Z pohledu příčného řezu byla všechna čidla umístěna do podélné osy pražce. Umístění snímačů A_k a A_p vzhledem ke stojině kolejnice bylo voleno koncepčně v souladu s metodikou měření in-situ popsanou v kapitole 4.2.2.1. Vzhledem k umístění čidla A_s do štěrku pod ložnou plochu pražce byl na ÚŽKS vyvinutý speciální měřicí kámen [57], viz kapitola 4.1.3.



Ab ... snímač na budiči (v případě eldyn. vibrátoru bude akcelerometr umístěn na roznášecí desce)

Ak ... snímač na patě kolejnice

Ap ... snímač na hlavě pražce

As ... měřicí kámen na ložné ploše pražce

Obr. 4-3 Schéma uspořádání měření; zdroj: autor

Označení kanálu	Umístění snímače a další specifikace	Vhodný typ snímače
Ab	(Rázové kladívko nebo) roznášecí deska elektrodynamického budiče; svisle; temeno kolejnice; včelí vosk;	jednoosý ICP; citlivost $10 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; max. zrychlení $700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
Ak	Kolejnice; svisle; snímač je umístěn na patě kolejnice 30 mm od její stojiny nebo co nejbližší hraně paty kolejnice; včelí vosk;	
Ap	Pražec; svisle; snímač je umístěn na hlavě pražce 185 mm od stojiny kolejnice nebo co nejbližší k uzlu upevnění; včelí vosk;	
As	Měřicí kámen; svisle; měřicí kámen je vložen pod ložnou plochu pražce v místě průsečnice se svislou osou kolejnice; umístění ve štěrku;	kapacitní MEMS

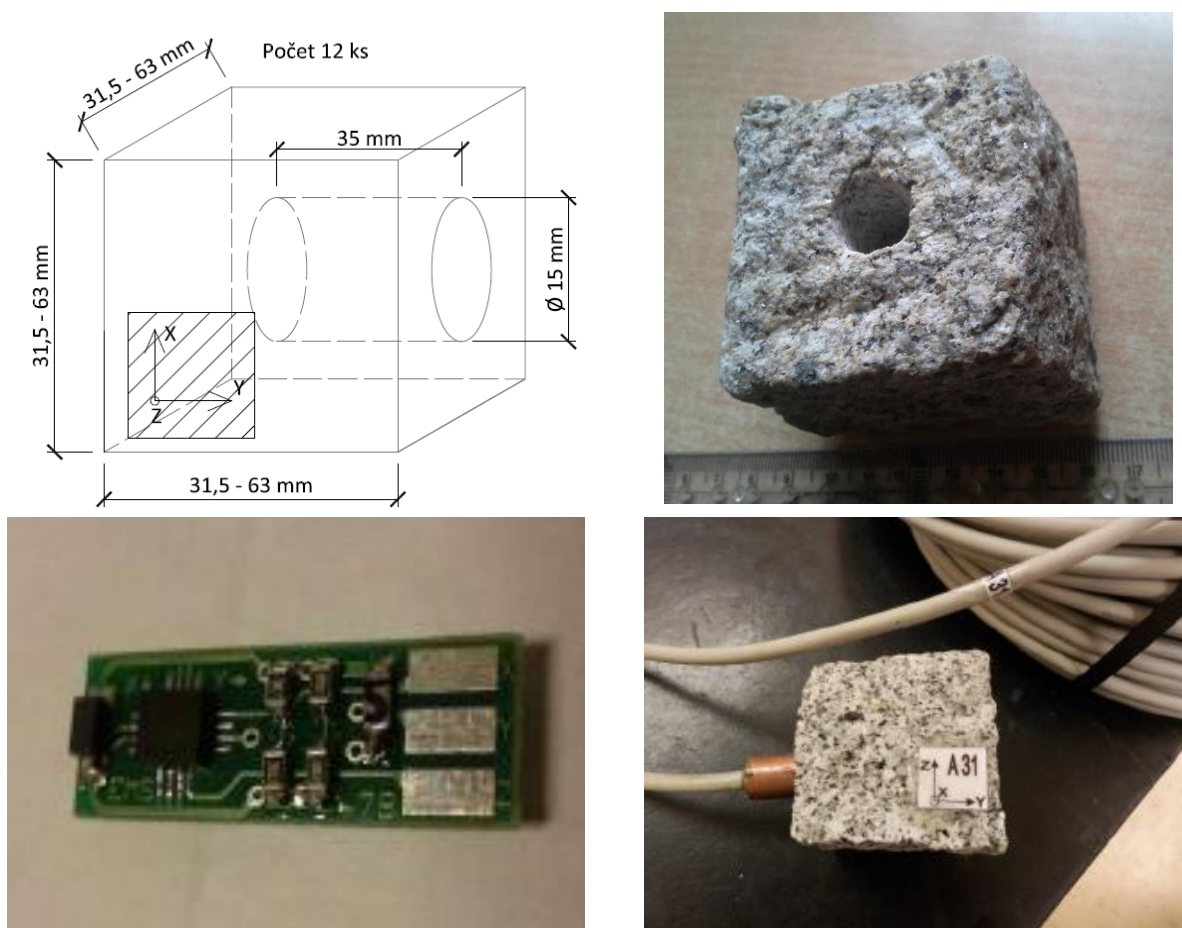
Tab. 4-1 Specifikace měřených kanálů; zdroj: autor

4.1.3 Výběr snímačů zrychlení vibrací

Pro daná měření jsem zvolil akcelerometry. Tato čidla mají pro moje účely výhodné vlastnosti. Především je charakterizuje široký pracovní rozsah, definovaná linearita v pracovních mezích, pevná a robustní konstrukce, vysoká spolehlivost, dlouhodobá stabilita a nízká hmotnost neovlivňující chování konstrukce. Snímače navíc nemají pohyblivé části citlivé k opotřebení. Z několika možností, kterými ÚŽKS disponuje, byly vybrány akcelerometry od firmy Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, konkrétně snímače s TEDS (Transducer Electronic Data Sheet). Mají vestavěnou paměť s údaji pro jednodušší a rychlejší instalaci, což výrazně zkracuje dobu potřebnou k přípravě měření. K fixaci snímačů na zvoleném místě na kolejnici, pražci a roznášecí desce budiče byl použit včelí vosk. Je pro tyto účely velmi vhodným materiálem. Přílně k měřené části konstrukce

a téměř vůbec neovlivňuje výsledky měření. Nedochází tedy ke ztrátě ani ke zkreslení výstupních hodnot.

Pro měření odezvy v kolejovém loži na úrovni ložné plochy pražce byl vyvinutý speciální měřicí kámen, viz obr. 4-4. Po provedených zkušebních testech byla k jeho výrobě zvolena štípaná žulová dlažební kostka o jmenovitých rozměrech 60 x 60 x 60 mm (spadá do frakce zrna kolejového lože). V případě potřeby je možné pro výrobu měřicího kamene použít i další horninové typy, např. granulit, čedič, případně jiné. Do kostky byl vyvrtán kruhový otvor o průměru 15 mm a hloubky 35 mm pro vložení tříosého snímače zrychlení. Základ snímače tvořil čip MEMS od společnosti Analog Devices. Tento čip byl doplněn jednoduchým obvodem pro testování funkčnosti po připojení napájení, filtrem s dolní propustí 500 Hz, výstupními děliči a ochranou a stabilizací napájecího napětí. Současně byla navržena oboustranná destička plošných spojů. Osazený plošný spoj byl po připájení na kabel zalit do plastové trubičky. Byla použita speciální epoxidová zalévací hmota vhodná pro elektrotechnické účely. Plastová trubička byla následně vložena do měděné trubičky a vše bylo zalito do otvoru žulové kostky. Kolem plastové trubičky bylo nalepeno stínění kabelu. Uvedené řešení bylo zvoleno z důvodů mechanické a elektrické odolnosti snímače. Inspirací pro zhotovení měřicího kamene se staly zahraniční práce [58].



Obr. 4-4 Měřicí kámen; vlevo nahoře náčrtek; vpravo nahoře žulová kostka s vyvrtaným otvorem; vlevo dole kapacitní snímač MEMS; vpravo dole hotový měřicí kámen; zdroj: autor

4.1.4 Měřicí aparatura

Nejrychlejším a nejjednodušším způsobem, jak vybudit kmitání testované struktury je použití rázového kladiva. Rozsah frekvencí, který je účinně vybuzen, je dán tuhostí dotýkajících se povrchů a hmotností hlavy kladiva. Úderem hrotu do testované struktury je vyvolán silový impuls. Z hlediska frekvenčního obsahu je tento impuls do určité frekvence v podstatě plochý. Tím je dán frekvenční rozsah kladiva. Ten je možné měnit použitím různých typů hrotů a příp. hlav kladiva. Čím jsou materiály tužší, tím kratší je délka trvání pulsu a tím vyšší je frekvenční rozsah. Mezi hmotností kladiva a frekvenčním rozsahem pak platí nepřímá úměra. Výhodami této metody jsou snadná použitelnost v provozních podmínkách a rychlost daná malým rozsahem přípravných prací. Nevýhoda buzení rázovým kladívkem spočívá ve velkém činiteli amplitudy A_{max} / A_{ef} . V případě některých struktur může vysoký činitel amplitudy způsobit nelineární odezvu.

Další možností je buzení inerciálním elektrodynamickým budičem. Jeho hlavní výhodou je, že se přímo prostřednictvím připojovací desky montuje na zkoušenou strukturu a nevyžaduje použití finančně nákladného snímače síly. Zároveň umožňuje i aplikaci budících signálů získaných v rámci měření v terénu, jež jsou charakterizovány reálným frekvenčním obsahem. Z těchto důvodů je budící systém vybaven elektronickým řídicím systémem, který eliminuje v rámci buzení rezonance struktury. Kmitočtová charakteristika buzení není plochá, obsahuje rezonanční maxima a další rezonance zanáší testovaný objekt namontovaný na budiči. V rámci frekvenčního pásma se tedy zisk zesilovače musí měnit s kmitočtem. Tento zisk je nastavován kontrolérem, jenž dostává zpětnovazební informaci ze snímačů umístěných na testovaném objektu. K hlavním řídicím prvkům budiče patří generátor kmitočtu, měřič vibrací a obvod, který nastavuje úroveň. Digitální řídicí systém budiče tedy představuje výkonné a ekonomické řešení pro široké spektrum otřesových a vibračních testů. Jak je navíc z výše uvedeného popisu patrné, tento způsob buzení nevyžaduje snímač budící síly, vystačí se pouze se snímačem zrychlení v blízkosti budiče. Ve spojení s elektrodynamickým budičem umožňuje reprodukovat vlivy skutečného prostředí v laboratorních podmínkách. Pro testování konstrukcí se používá klasická průmyslová metoda testů náhodnými vibracemi, rozmítanými sinusovými kmity, otřesovými vibracemi i signály zemětřesení [59].

Ráz byl buzen kladivem Brüel & Kjær, typ 8210 Impact Hammer, s budícím hrotem Hard tip black. Pro řízené buzení v laboratoři ÚŽKS byl navíc pro srovnání použit elektrodynamický budič TIRA TV 51165-IN. Shaker S 517-IN byl umístěn přímo na hlavu kolejnice, a sice prostřednictvím speciálně upravené roznášecí desky. Aparatura budiče TIRA se dále sestávala ze zesilovače Amplifier BAA 1000, dmýchadla SB0140 a čtyř-kanálového řídicího systému VibrationVIEW. Data z obou metodik měření byla zpracována pomocí modulárního analyzátoru PULSE 3560D od společnosti Brüel & Kjær. Uspořádání měření je patrné z obr. 4-5 a obr. 4-6.



Obr. 4-5 Uspořádání měření buzení rázem; zdroj: autor



Obr. 4-6 Uspořádání měření prostřednictvím elektrodynamického budiče; zdroj: autor

4.1.5 Parametry měření

Na každém vzorku testovaného upevnění byla provedena série čtyř měření po deseti úderech kladiva, z nichž vždy první měření sloužilo pouze k ustálení pozice testovaného vzorku a nebylo vyhodnoceno. Pro vybrané vrtulové typy upevnění pak byl stejným postupem ověřen ještě nedotažený, resp. přetažený stav v rozpětí 50 MN od předpisové hodnoty.

Při měření s elektrodynamickým budičem byla nastavena hodnota generovaného zrychlení na $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Jedná se o maximální zrychlení, které umožňovalo stabilní řízení budiče. Každý vzorek byl takto vybuzen dvakrát. Zkouška vlivu dotažení vrtule tímto způsobem buzení prováděna nebyla.

Frekvenční rozsah obou typů měření byl po prvních několika zkušebních pokusech s rázovým kladivem zvolen $0 \div 1000 \text{ Hz}$. Frekvence vyšší než $1,0 \text{ kHz}$ jsou zajímavé zejména z akustického hlediska, jež nebylo předmětem laboratorních testů. Vyhodnocení měření je popsáno v kapitole 7.1.

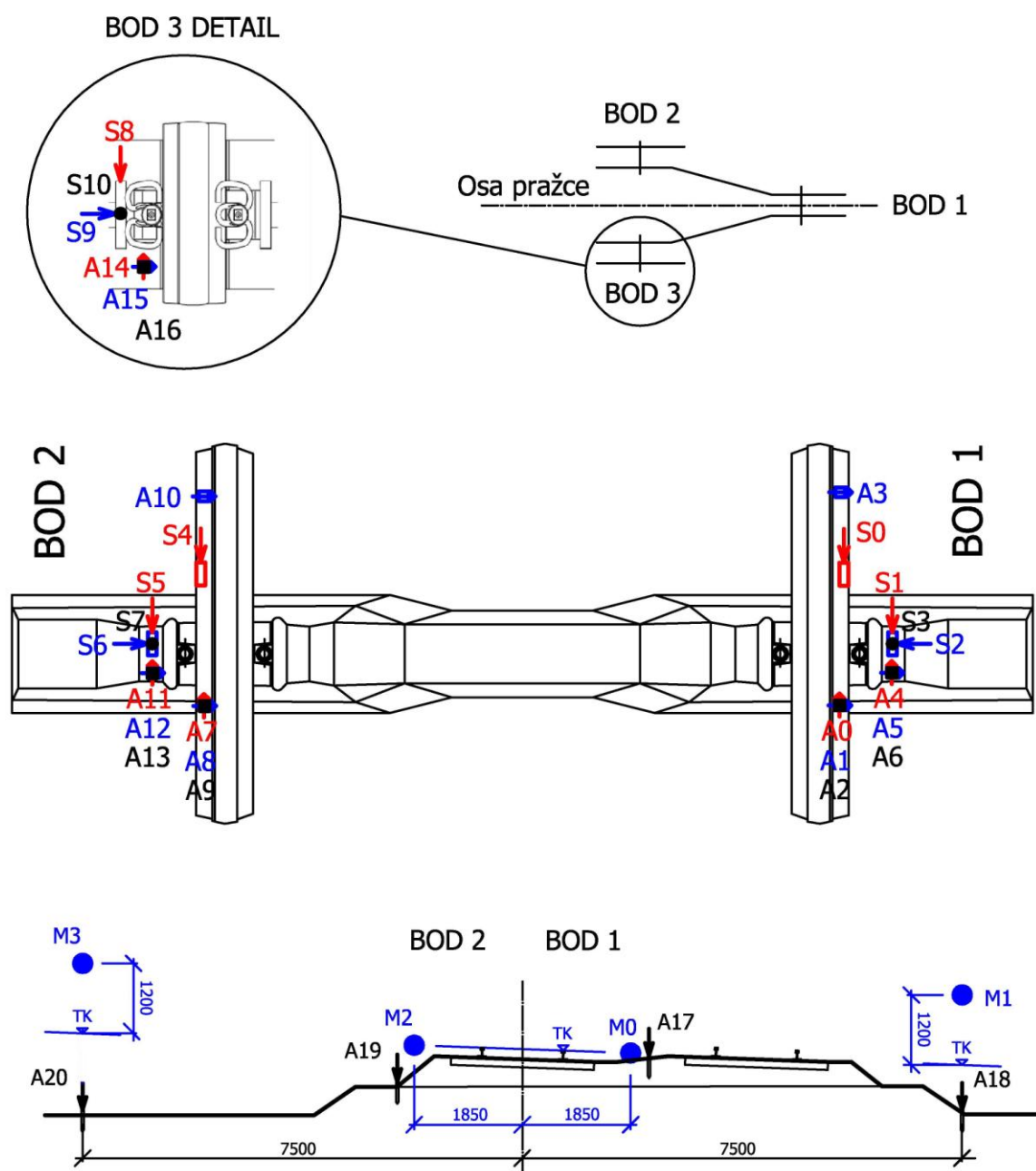
Čidla a měřicí cesty byly před použitím kalibrovány. Pro akcelerometry byl jmenovitě zvolen kalibrátor 4294 Brüel & Kjær, který na frekvenci $159,15 \text{ Hz}$ generuje zrychlení $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2 Měření in-situ

Měřicí řetězec pro měření in-situ byl sestaven na základě odborné rozvahy a konzultací a také s ohledem na rešeršní činnost. Úvodní měření a analýzy byly prováděny již v rámci diplomové práce.

Navržená metodika měření má sloužit pro porovnávání jednotlivých konstrukcí upevnění kolejnic, má pomoci odhalit jejich slabá místa a predikovat vliv na provozovanou kolej z dlouhodobého hlediska. V běžné koleji se vlivem provozu nepředpokládají problémy deformačního charakteru, jak tomu může být například v srdcovkových částech výhybek a kolejových křižovatek [70]. Úlohy týkající se napjatosti a držebnosti upevnění či únavy materiálu jsou dostatečně pokryty zkouškami v rámci normové řady ČSN EN 13481 a to včetně provozního ověřování. Silové účinky běžného provozu se očekávají u testovaných konstrukcí vždy srovnatelné, což má být zajištěno výběrem vhodného stanoviště měření, jak je popsáno v kapitole 6. Z těchto důvodů nebyla v rámci metodiky měření in-situ navržena část týkající se analýzy silového působení a napětí v konstrukci.

Na obr. 4-7, resp. v tab. 4-2 až tab. 4-4 jsou uvedeny všechny možné kombinace snímačů, které při měření in-situ však nikdy nebyly použity pohromadě. Konkrétní sestavy čidel jsou uvedeny u jednotlivých případových studií v kapitole 7.2. Pro názornost je označení kanálu čidla barevně odlišeno. Červená barva značí podélný směr a modrá barva směr příčný vzhledem k ose koleje. Černou barvou je označený směr svislý.



LEGENDA:

- ↓ → ● - SNÍMAČE POSUNUTÍ (PODÉLNÝ, PŘÍČNÝ, SVISLÝ SMĚR)
- ⬇ ⬅ ■ - SNÍMAČE ZRYCHLENÍ VIBRACÍ (PODÉLNÝ, PŘÍČNÝ, SVISLÝ SMĚR)
- - SNÍMAČE AKUSTICKÉHO TLAKU (PŘÍČNÝ SMĚR)

Obr. 4-7 Schéma uspořádání měření; zdroj: autor

4.2.1 Měření posunů vyvolaných zatížením konstrukce

Důležitou měřenou veličinou k určování stability konstrukce železničního svršku je časový průběh výchylky kmitání, tedy dráha reprezentující zdvihy a poklesy. Dle výchylky kmitání je možné odhalit některé dynamické jevy v nízkofrekvenční oblasti, které pouze na základě vibrodiagnostiky nemusejí být tolik patrné. Jmenovitě se jedná např. o průhyby příčných pražců po délce pražce nebo průhyby kolejového roštu podél osy koleje. Tyto jevy mají úzkou souvislost nejen s typem dynamického namáhání, ale také s možným nerovnoměrným podepřením pražců, apod.

Měření absolutních posunů kolejové jízdní dráhy je obtížné. Přímá metoda měření prostřednictvím snímačů posunutí je velmi nesnadná. Jen obtížně lze totiž v bezprostředním okolí dráhy nalézt vztažný pevný bod. Jednou z mála možností je např. vyhloubení vrtané sondy do hloubky několika metrů a vůči tyči, jejíž konec je zabetonovaný na dně sondy, měřit posuny. Nevýhodou této metody je její cena, čas potřebný k vyvrtání sondy a s tím související nutnost vyloučit dotčenou kolej z provozu, dále porušení původního uložení pražců v kolejovém loži při vrtání sondy. Pro tyto skutečnosti se uvedená metoda měření prakticky nepoužívá.

Nepřímé metody měření posunů jsou založeny na výpočtu posunutí ze záznamu zrychlení vibrací dvojitou integrací (jak hardwarovou tak softwarovou), příp. jednoduchou integrací ze záznamu rychlosti vibrací. Tato metoda měření je teoreticky použitelná jen pro krátké oblasti signálu. Při integraci snímaných vzorků zrychlení vibrací totiž dochází ke dvojnásobnému sčítání chyb měření. Byly vyvinuty některé metody pro výpočet posunutí v rámci podvozku vozu, nejsou však v současné době obecně použitelné. Měření rychlosti vibrací není rozšířeno zejména z důvodu vysoké ceny snímačů rychlosti vibrací. Větší rozměry snímačů rychlosti vibrací brání umístit snímač na některá zvolená místa v konstrukci koleje.

Z výše uvedených důvodů byl kolejový rošt osazen sestavou snímačů dráhy, které měří relativní posuny vůči pláni tělesa železničního spodku. Metodika byla navržena tak, aby umožňovala dosažení přijatelných výsledků ve smyslu velikosti výsledných relativních posunů vzhledem k těm předpokládaným absolutním.

4.2.1.1 Uspořádání měření

Snímače dráhy jsou umístěny na patě kolejnice a v hlavových částech pražce, co nejbližší k podélné ose pražce. Tyto oblasti kolejového roštu vykazují v běžné koleji pravidelně nejvyšší posuny. V místě snímačů na pražci působí dle teoretických předpokladů přibližně srovnatelný ohybový moment a tedy i srovnatelné napětí, ať už se jedná o pražec podepřený v části úložné plochy nebo pražec podepřený po celé svojí délce. První případ je typický pro kolej bezprostředně po podbití, druhý případ pak pro některé provozované koleje. Snímač na patě kolejnice má umožňovat sledování podélného posunutí kolejnice vůči pražci. Oba konce betonového pražce jsou osazeny z důvodu sledování nerovnoměrného zatlačování kolejového roštu v oblouku a z důvodu sledování ohybu pražce ve třech směrech – podélně s osou koleje, kolmo na ní a ve svislé rovině. U ocelového pražce tvaru Y byla snímači osazena také druhá hlava pražce v rozevřené části pražce. Je to, vyjma již zmíněných důvodů,

také za účelem sledování způsobu roznosu zatížení v této nepravidelné konstrukci. Střed pražce nebyl snímači osazen. Předchozí měření a teoretické práce potvrdily velmi malé výchylky kmitání pražce v těchto místech. Tyto práce byly zaměřeny na tratě s různým stupněm údržby a kvality kolejové jízdní dráhy [11, 30, 61, 83, 84].

Označení kanálu	Umístění snímače a další specifikace	Vhodný typ snímače
S0	Pata kolejnice; podélně; na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; přípravek pod patu kolejnice; izolační podložka; rám ve štěrku;	indukčnostní; citlivost $80 \text{ mV} \cdot \text{V}^{-1}$; doporučený pracovní rozsah 10 mm;
S1	Pražec; podélně; na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; přípravek na hlavu pražce u betonového pražce; izolační podložka u ocelového pražce; rám ve štěrku;	
S2	Pražec; příčně; na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; přípravek na hlavu pražce u betonového pražce; izolační podložka u ocelového pražce; rám ve štěrku;	
S3	Pražec; svisle; na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; přípravek na hlavu pražce u betonového pražce; izolační podložka u ocelového pražce; rám ve štěrku;	
S4	Pata kolejnice; podélně; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; přípravek pod patu kolejnice; izolační podložka; rám ve štěrku;	
S5	Pražec; podélně; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; přípravek na hlavu pražce u betonového pražce; izolační podložka u ocelového pražce; rám ve štěrku;	
S6	Pražec; příčně; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; přípravek na hlavu pražce u betonového pražce; izolační podložka u ocelového pražce; rám ve štěrku;	
S7	Pražec; svisle; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; přípravek na hlavu pražce u betonového pražce; izolační podložka u ocelového pražce; rám ve štěrku;	
S8	Ocelový pražec; podélně; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; izolační podložka; rám ve štěrku;	
S9	Ocelový pražec; příčně; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; izolační podložka; rám ve štěrku;	
S10	Ocelový pražec; příčně; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; izolační podložka; rám ve štěrku;	

Tab. 4-2 Specifikace měřených kanálů - posuny; zdroj: autor

4.2.1.2 Výběr snímačů dráhy

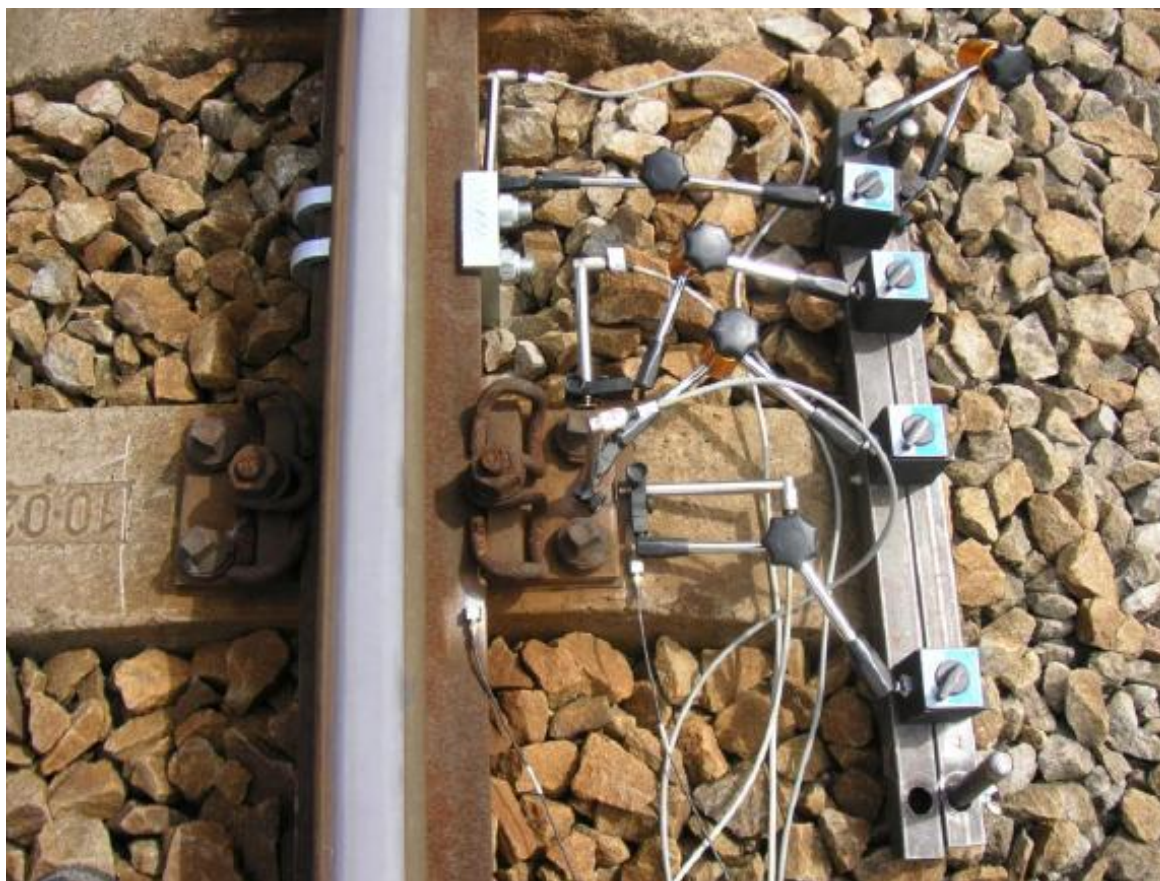
Mezi snímače dráhy, které pro daná měření přicházely v úvahu, patří např. laserové snímače. Měření prostřednictvím laserových snímačů probíhá dvěma principy. První systém obsahuje laser, který vysílá paprsek (kolmo na sledovaný směr posunů) na citlivé čidlo

zaznamenávající polohu dopadu paprsku. Laser je upevněn mimo kolej, čidlo je přilepeno na sledované konstrukci. Systém lze ale aplikovat i tak, že laser umístíme na testovanou konstrukci a čidlo mimo trať. Maximální pracovní rozsah je 5 až 6 mm v závislosti na velikosti čidla. Druhý princip spočívá v přímém měření vzdálenosti mezi laserem a měřeným místem. K měřenému místu je uchycena odrazná destička. Laserový paprsek tak leží v rovině sledovaného posunutí. Nevýhodami laserových snímačů jsou jejich vysoké pořizovací náklady vzhledem k požadované přesnosti měření a složité umísťování do trati v některých sledovaných směrech a místech. Dopadající paprsek také nesmí být cloněný, což je v případě rozsáhlých měření problém (přítomnost dalších čidel, kabelů a jiných přípravků). Další možností je měření pomocí videozáznamu vysokofrekvenční kamery. Vzhledem k charakteru měření však není tento způsob prakticky použitelný.

S ohledem na vybavení ÚŽKS a také s ohledem na výše uvedené jsem se rozhodl použít indukčnostní snímače dráhy od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Jedná se o odolná čidla vůči prachu a vlhkosti, s dobrou linearitou. Jejich obrovskou výhodou je skutečnost, že výstupní veličinou je veličina měřená, tedy dráha v milimetrech. Při analýze signálů proto není nutné provádět žádné dodatečné přepočty, čímž se šetří čas a výsledek není zatížen výpočetní chybou. Pracovní rozsah čidel je 10 mm, což je vzhledem k maximálním očekávaným posunům ± 3 mm naprosto dostačující.

Pro osazení indukčnostních snímačů je zapotřebí řada přípravků, které dokáží snímače pevně udržet v definované poloze při průjezdu vlakové soupravy. Pro tento účel byl na ÚŽKS vyvinut speciální fixační systém, který byl v rámci juniorského projektu specifického výzkumu číslo 891/2010 „Komplexní monitoring a analýza dynamicko-akustických jevů v koleji“ registrován jako funkční vzorek [62]. V daném projektu jsem byl vedoucím řešitelem. Fixační systém sestává z ocelového rámu tvořeného tyčemi délky 800 mm a průměru 20 mm. Tyče jsou v rámci přípravy měření zatlučeny do kolejového lože. Délka tyčí zajišťuje, že hrotová část spočívá v dostatečné hloubce konstrukčních vrstev železničního spodku, příp. v zemní pláni. Tímto způsobem se vytvoří vztažná hladina měření, u níž se předpokládá, že se bude pod zatížením přetvářet jen minimálně. Tyče jsou spojeny v tuhý rám prostřednictvím speciálního ocelového nosníku délky 640 mm vybaveného otvory pro tyče a závitovým systémem uchycení. Na tento nosník se přichytávají magnetické držáky umožňující nastavitelné uchycení indukčnostních snímačů dráhy. Součástí systému je také speciální objímka paty kolejnice, která vytvořila opěrnou plochu pro hrot snímače podélné dráhy na kolejnici.

Hroty snímačů posunu bylo nutné odizolovat od vodivých částí testovaných konstrukcí vložením podložky z nevodivého a tvarově stálého materiálu. Podložky byly k určeným místům uchyceny jednosložkovým vteřinovým lepidlem.



*Obr. 4-8 Přípravek pro experimentální analýzu pohybového chování železničního roštu;
zdroj: autor*

4.2.2 Měření vibrací šířících se konstrukcí do okolí trati

Dynamické účinky na konstrukce nejlépe vystihuje časový průběh zrychlení, příp. rychlosti kmitání [7]. Z toho důvodu byla jako stěžejní součást metodiky měření in-situ navržena vibrodiagnostika uzlu upevnění prostřednictvím akcelerometrů.

4.2.2.1 Uspořádání měření

Trojosé akcelerometry pro měření zrychlení vibrací v podélném a příčném směru vůči ose koleje a ve svislé rovině jsou umístěné na hlavě pražce i na patě kolejnice co nejtěsněji k uzlu upevnění. Tím je do značné míry eliminován vliv šíření vibrací materiálem mimo samotné upevnění kolejnic. Jsou doporučena místa v podélné ose pražce, vzdálená 30 mm od stojiny pro snímač na patě kolejnice, resp. 185 mm pro snímač na pražci. V těchto vzdálenostech se nacházejí vhodné, prakticky vodorovné plochy jak u kolejnicového pásu tvaru 60 E1 nebo 60 E2, tak i u velké řady betonových a ocelových pražců. Je tak dosaženo optimálního záznamu tlumících vazeb kolejového roštu v jeho nejcitlivějším místě – v uzlu upevnění. Pro potřeby měření byl vybrán uzel upevnění na hlavě pražce, kde by, z již známých důvodů, měl být do jisté míry omezen vliv kvality podbití koleje. Z možných příčin nerovnoměrného roznosu zatížení, zejména pak v koleji ve směrovém oblouku, jsou čidla osazena po obou stranách pražce. U ocelového pražce tvaru Y byla snímači osazena také druhá hlava v rozevřené části pražce, kvůli sledování příp. abnormalit této tvarově

nepravidelné konstrukce. Jednoosé akcelerometry s měřicí osou kolmou na osu koleje byly také umístěny na vnějších hranách paty kolejnicových pásů, a to v ose mezipražcového prostoru. Toto místo je, vezmeme-li v úvahu standardní model kolejnicového pásu jako spojitého nosníku na diskrétních pružných podporách, velmi zajímavé. Lze předpokládat, že v obloucích se zde ve zvýšené míře projevují interakční síly mezi kolem a kolejnicí. Vibrace šířící se šterkovým ložem dále do konstrukčních vrstev železničního spodku a zemního tělesa jsou z hlediska stability konstrukce trati zásadní. Jedná se o vibrace převážně nízkých frekvencí. Úkolem optimálně navržené konstrukce železničního svršku je, mimo jiné, tyto vibrace co nejvíce eliminovat, což má pozitivní vliv na zachování vstupních parametrů GPK. Instalací jednoosých akcelerometrů oboustranně v oblasti paty kolejového lože bude možné srovnávat míru dynamického působení na pláni tělesa železničního spodku a jeho možný vliv na stabilitu pražcového podloží. Jednoosé akcelerometry ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje mají zachytit složky zejména Rayleighových vln šířících se zemí do odlehlejšího okolí trati. Vzdálenost byla zvolena shodně s předpoklady pro umístění hlukových mikrofónů, viz kapitola 4.2.3.1, a také v souladu s metodikou [64]. Bude tak možné porovnat výsledky této práce s výsledky měření externích subjektů.

Označení kanálu	Umístění snímače a další specifikace	Vhodný typ snímače
A0	Pata kolejnice; podélně; na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	tříosý ICP; citlivost $1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; max. zrychlení $5000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
A1	Pata kolejnice; příčně; na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	
A2	Pata kolejnice; svisle; na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	
A3	Pata kolejnice; příčně; v ose mezipražcového prostoru; na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	jednoosý ICP; citlivost $1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; max. zrychlení $7000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
A4	Pražec; podélně; na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	tříosý ICP; citlivost $10 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; max. zrychlení $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
A5	Pražec; příčně; na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	
A6	Pražec; svisle; na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	
A7	Pata kolejnice; podélně; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	tříosý ICP; citlivost $1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; max. zrychlení $5000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
A8	Pata kolejnice; příčně; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	
A9	Pata kolejnice; svisle; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	

Tab. 4-3 Specifikace měřených kanálů - vibrace; zdroj: autor

Označení kanálu	Umístění snímače a další specifikace	Vhodný typ snímače
A10	Pata kolejnice; příčně; v ose mezipražcového prostoru; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	jednoosý ICP; citlivost $1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; max. zrychlení $7000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
A11	Pražec; podélně; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	tříosý ICP; citlivost $10 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; max. zrychlení $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
A12	Pražec; příčně; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	
A13	Pražec; svisle; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	
A14	Ocelový pražec; podélně; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	tříosý ICP; citlivost $10 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; max. zrychlení $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
A15	Ocelový pražec; příčně; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	
A16	Ocelový pražec; svisle; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; podložka B & K;	
A17	Na spodní hraně kolejového lože; svisle; v ose pražce; na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; měřicí kolík + podložka B & K;	jednoosý ICP; citlivost $10 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; max. zrychlení $700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
A18	Vzdálenost 7,5 m od osy koleje; svisle; v ose pražce na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; měřicí kolík + závit;	jednoosý ICP; citlivost $100 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; max. zrychlení $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
A19	Na spodní hraně kolejového lože; svisle; v ose pražce; na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; měřicí kolík + podložka B & K;	jednoosý ICP; citlivost $10 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; max. zrychlení $700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
A20	Vzdálenost 7,5 m od osy koleje; svisle; v ose pražce na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; měřicí kolík + závit;	jednoosý ICP; citlivost $100 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; max. zrychlení $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;

Tab. 4-3 Specifikace měřených kanálů – vibrace (pokračování); zdroj: autor

4.2.2.2 Výběr snímačů zrychlení vibrací

Výhody použití akcelerometrů již byly shrnuty v kapitole 4.1.3. Připevnění na sledované místo kolejového roštu a na patu kolejového lože bylo realizováno prostřednictvím izolačních plastových podložek Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S. Podložky jsou opatřeny úchyty. Díky drážkám na těle se akcelerometry do podložek jednoduše zasunou a podložka se jednosložkovým vteřinovým lepidlem přichytí ke konstrukci. Akcelerometry umístěné 7,5 m od osy koleje se zašroubovaly do speciálně upraveného přípravku, viz odstavec níže.

Pro zajištění přenosu vibrací z pláň tělesa železničního spodku, resp. ze zemního tělesa byl vyvinut měřicí kolík průřezu T, který byl následně v rámci řešení juniorského projektu specifického výzkumu číslo 891/2010 „Komplexní monitoring a analýza dynamicko-akustických jevů v koleji“ uveden jako funkční vzorek [63]. Kolík se zatluče do zkoumané vrstvy a na jeho hlavu se upevní snímač. Snímač je možné fixovat pomocí plastové podložky nebo díky kovové podložce se závitovým čepem zašroubovaným do připraveného otvoru v hlavě měřicího kolíku. T průřez kolíku má zvětšit kontaktní plochu přípravku a má rovněž zamezit jeho protáčení či vysouvání.

Včelí vosk, který se běžně používá v podobných aplikacích v laboratoři, příliš pro měření in-situ nedoporučuji. Při vysokých teplotách dochází k jeho ztekucování a následné ztrátě držebnosti, zatímco v zimních měsících je zase obtížné ho zpracovat. Včelí vosk je navíc náchylný na znečištění prachovými částicemi, které jeho vlastnosti dále znehodnocují.



Obr. 4-9 Tříosý akcelerometr uchycený do plastové podložky; zdroj: autor



Obr. 4-10 Měřicí kolík průřezu T; zdroj: autor

4.2.2.3 Buzení rázovým kladivem in-situ

Buzení konstrukce rázovým kladívkem v terénu má stejné uspořádání a typy čidel, jako při laboratorním měření, viz kapitola 4.1.2. Jelikož však měření probíhalo v provozované koleji, nebyl do kolejového lože umístěn snímač As. Jeho vložení by totiž vyžadovalo odhrnutí štěrku z oblasti sledované hlavy pražce, umístění měřicího kamene pod ložnou plochu pražce, opětovné zasypání štěrku a zhutnění porušené oblasti. Celý postup by se pak navíc opakoval při vyndávání kamene z kolejového lože. Tyto úkony by měly negativní dopad na bezpečnost jak účastníků měření, tak i provozování drážní dopravy, což je v rozporu se vstupními požadavky kladenými na vytvářenou metodiku měření. Pro srovnání terénních výsledků s laboratorními jsou čidla na pražci, resp. na kolejnici dostačující.

4.2.3 Měření hluku šířícího se do okolí trati

Přestože negativní účinky hluku z železnice zaujímají v odvětví dopravy marginální postavení, důležitou součástí diagnostiky vlastností kolejové jízdní dráhy je bezesporu měření akustických emisí trati. Daná problematika nabývá na aktuálnosti i díky rozšiřujícím se systémům příměstské železniční dopravy vedené v hustě osídlených oblastech napříč celou Českou republikou.

4.2.3.1 Uspořádání měření

Česká technická norma ČSN EN ISO 3095 [65] uvádí zásady pro volbu a umístění snímačů akustického tlaku. Pro získání akustických parametrů jsem zvolil čtyři mikrofony pro volné pole. Dva z nich byly umístěny ve vnitřní straně směrového oblouku a dva ve vnější. V přímé koleji byla takto osazena pouze jedna strana, přednostně vně koleje. Umístění mikrofonů bylo nutné volit tak, aby zvukové vlny mířily ke snímači v co nejmenším, pokud možno nulovém, úhlu. Z toho důvodu byla osa každého mikrofonu nastavena vodorovně.

Osy všech mikrofonů byly v jedné rovině kolmé k ose koleje. Umístění mikrofonů v řezu touto rovinou bylo ve vzdálenosti 1,85 m a 7,5 m od osy koleje. Dva mikrofony v bližší vzdálenosti (na straně vnitřní a vnější) jsou umístěny optimálně v ose sledovaného uzlu upevnění, výškově na spojnici temen kolejnicových pásů. Tyto snímače akustického tlaku sloužily k zachycení odezvy v oblasti blízké kontaktu kolo-kolejnice. Bylo proto účelné je umístit co nejblíže ke zdroji valivého hluku, s ohledem na průjezdný průřez trati.

Mikrofony umístěné 7,5 m od osy koleje pak zaznamenávají hluk vzdáleného pole. Poloha těchto snímačů byla rovněž v ose pražců, ve výšce 1,2 m nad spojnici temen kolejnicových pásů. Pro zajištění horizontální vzdálenosti 7,5 m bylo použito pásmo. Místo protnutí spojnice temen kolejnicových pásů v této vzdálenosti bylo zjištěno pomocí digitálního měřidla s laserovým zaměřovačem. K tomuto bodu v prostoru byla pak jednoduše přičtena výška 1,2 m a tím jednoznačně určena poloha mikrofonu. Umístění mikrofonu bylo voleno v souladu s metodikou měření hluku na kolejových vozidlech [66], aby mohlo být provedeno srovnání mezi jednotlivými měřeními.

Označení kanálu	Umístění snímače a další specifikace	Vhodný typ snímače
M0	Vzdálenost 1,85 m od osy koleje, výška na spojnici temen kolejnicových pásů; v ose pražce na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; stativ, příp. tyč;	mikrofon pro volné pole 0,50 in; citlivost $50 \text{ mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$; doporučený dynamický rozsah $16,5 \div 138 \text{ dB}$;
M1	Vzdálenost 7,5 m od osy koleje, výška 1,2 m nad spojnici temen kolejnicových pásů; v ose pražce na straně vnitřní vzhledem k směrovému oblouku; stativ;	mikrofon pro volné pole 0,25 in; citlivost $12,5 \text{ mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$; doporučený dynamický rozsah $35 \div 130 \text{ dB}$;

Tab. 4-4 Specifikace měřených kanálů - hluk; zdroj: autor

Označení kanálu	Umístění snímače a další specifikace	Vhodný typ snímače
M2	Vzdálenost 1,85 m od osy koleje, výška na spojnici temen kolejnicových pásů; v ose pražce na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; stativ, příp. tyč;	mikrofon pro volné pole 0,50 in; citlivost $50 \text{ mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$; doporučený dynamický rozsah $16,5 \div 138 \text{ dB}$;
M3	Vzdálenost 7,5 m od osy koleje, výška 1,2 m nad spojnici temen kolejnicových pásů; v ose pražce na straně vnější vzhledem k směrovému oblouku; stativ;	mikrofon pro volné pole 0,25 in; citlivost $12,5 \text{ mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$; doporučený dynamický rozsah $35 \div 130 \text{ dB}$;

Tab. 4-4 Specifikace měřených kanálů – hluk (pokračování); zdroj: autor

4.2.3.2 Výběr snímačů akustického tlaku

V blízkém hlukovém poli byly použity půlpalcové mikrofony Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S. Ve vzdáleném pak čtvrtpalcové mikrofony od téže společnosti.

Mikrofony byly dle terénních podmínek umístěny na stativech různých nastavitelné výšky, příp. na ocelových tyčích zatlučených do pražcového podloží nebo do zemního tělesa.



Obr. 4-11 Příklady uchycení mikrofonu na stativu (vlevo) nebo na ocelové tyči (vpravo); zdroj: autor

4.2.4 Měřicí aparatura

Snímače byly pomocí kabeláže zapojeny do integrované měřicí PC sestavy DEWETRON. Hardware PC sestavy umožňuje současné měření zrychlení vibrací na 16 kanálech, dále pak obsahuje 16 napěťových portů a 12 vstupů pro zapojení indukčnostních snímačů. Systém rovněž umožňuje vytvoření virtuálních kanálů s filtrací a integrací pro vzájemný převod zrychlení na rychlost anebo výchylku kmitání. Kapacitu měření je možné dále navýšit přidáním dalších měřicích modulů ovládaných z přenosného počítače. Záznamy byly ukládány na pevném disku ústředny.

4.2.5 Parametry měření

Do vyhodnocovacího programu PC sestavy DEWESoft je nutné vhodně navolit vzorkovací frekvenci a hodnoty horních a dolních propustí. Správné nastavení těchto vstupních parametrů je velmi důležité. Vzorkovací frekvence musí být zvolena pro měření hluku a vibrací stejná, což je dáno vlastnostmi použité měřicí ústředny. Vzorkovací frekvence představuje počet naměřených hodnot za jednotku času, obvykle za jednu vteřinu. Aby byl dodržen Shannonův-Kotělnikovův vzorkovací teorém, je nutno zvolit vzorkovací frekvenci větší než dvojnásobek nejvyšší frekvence vzorkovaného signálu. V opačném případě by mohla být zpětná rekonstrukce digitalizovaného signálu nedokonalá. Vzhledem k předpokládaným vyhodnocovacím metodám byla zvolena vzorkovací frekvence 30,0 kHz.

Z hlediska dynamických parametrů jsou pro nás zásadní frekvence do 1,0 kHz. Frekvence vyšší než 1,0 kHz již nemají na dynamické chování konstrukce velký vliv. Proto byla pro všechny snímače zrychlení vibrací nastavena hodnota dolní propusti právě 1,0 kHz. Horní propust má za úkol odstranit rušivé prvky při nízkých frekvencích, jakým je např. triboelektrický šum. Tento šum vzniká mezi kabelem a izolátorem kabelu za vzniku povrchového náboje. Z toho důvodu byla na snímačích umístěných v kolejovém roštu a u mikrofónů zvolena horní propust 3,4 Hz. U snímačů na pláni tělesa železničního spodku a v zemním tělese lze předpokládat výrazné nízkofrekvenční složky, proto byla horní propust u těchto snímačů snížena na 1,0 Hz.

Vyhodnocovány byly průjezdy vlakové dopravy. Podrobnosti o dynamickém zatížení jsou uvedeny u jednotlivých případových studií v kapitole 7. Měření probíhala podle níže uvedených zásad. Všechny údaje byly zaznamenány do protokolu o zkoušce, pro každou měřicí kampaň samostatně.

Všechna čidla a měřicí cesty byly před každým měřením kalibrovány. U snímačů dráhy byla použita sada Johansonových kostek. Kalibrace probíhala po jejich kompletním osazení na měřené konstrukci v den měření in-situ. U akcelerometrů byl zvolen stejně jako v případě laboratorních měření kalibrátor 4294 Brüel & Kjær. Snímače byly kalibrovány v prostorách ÚŽKS v rámci předpřípravy na měření. Stejným způsobem probíhala rovněž kalibrace mikrofónů. Pro mikrofony byl použit akustický kalibrátor Brüel & Kjær, který na frekvenci 1,0 kHz vyvozuje hladinu akustického tlaku 94 dB.

4.2.5.1 Zkušební místo

Dle požadavků normy ČSN EN ISO 3095 musí být povrch terénu místa měření přibližně rovný a se sklonem vůči temenu kolejnice 0 m až -2 m. Tyto podmínky mají být splněny proto, aby se hluk v krajině mohl volně šířit.

V okolí mikrofونů na obou stranách se nesmí nacházet žádné velké odrazivé objekty, jako jsou skály, kopce, mosty nebo budovy. Prostor kolem mikrofونů je určen pomyslnými kružnicemi o poloměru rovnajícím se minimálně trojnásobku měřené vzdálenosti, v mém případě tedy min. 22,5 m. Středy těchto kružnic tvoří samotné mikrofony. V blízkosti mikrofонů nesmějí být žádné překážky, které by mohly narušovat zvukové pole. Z toho důvodu se mezi zdrojem hluku a mikrofony nesmějí pohybovat žádné osoby. Pozorovatel musí být na takovém místě, aby zásadním způsobem neovlivňoval měřenou hladinu akustického tlaku.

Negativní vliv na zkoušku má také situace, kdy se v prostoru mezi mikrofonom a vozidlem nachází objekty, jejichž materiál pohlcuje nebo odráží hluk. Z tohoto důvodu například nesmí být zkušební stanoviště zamokřeno. Mezi látky pohlcující hluk patří vysoká vegetace, sníh, popř. jiné koleje. Odrazivý charakter má například voda nebo led. Je proto potřeba vybrat takové místo, jež je v maximální míře bez těchto prvků.

Další požadavky na výběr vhodného místa měření jsou uvedeny v kapitole 6.

4.2.5.2 Klimatické podmínky

Klimatické podmínky se co hodinu zapisují do protokolu měření ve formě tabulky. Zaznamenává se aktuální počasí, teplota a vlhkost vzduchu, atmosférický tlak a rychlost větru. Poslední zmíněná charakteristika je z klimatických podmínek asi nejdůležitější. Aby nedocházelo ke zkreslování údajů, provádějí se měření pouze při rychlostech větru menších než $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Rychlost větru se měřila pomocí přenosného anemometru ve výšce mikrofонů.

Další podmínkou jsou příznivé povětrnostní podmínky bez výskytu intenzivnějších vodních srážek, které by jinak ohrožovaly přístrojové vybavení. Teplota vzduchu, barometrický tlak a vlhkost vzduchu byly zjišťovány pomocí přenosné meteorologické stanice.

4.2.5.3 Měření teploty kolejnicových pásů

Teplota kolejnice se měřila bezdotykově pomocí infračerveného digitálního teploměru, opatřeného bodovým laserovým zaměřovačem. Teploměr pracuje na principu snímání vyzařovaného tepelného vlnění, které vystupuje z povrchu kolejnice. Laserový paprsek označuje červeným bodem střed snímané plochy a slouží tak k jednoduššímu zaměření místa, jehož teplotu potřebujeme zjistit. Naměřená teplota představuje průměr snímané plochy. Proto čím menší snímaná plocha je (a tedy čím menší vzdálenost od kolejnice), tím přesnější výsledek nám teploměr ukazuje. V souladu s doporučeními předpisu SŽDC S 3/2 [67] byl teploměr kalibrován s přesností čtení na $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dále se doporučuje měřit teplotu na zastíněné stojině kolejnice. Praxe měření teploty kolejnic upozornila na problematiku určení skutečné vnitřní teploty kolejnic. Podle zkušeností

tuto skutečnou teplotu nelze získat, neboť je ovlivněna teplotním spádem v kolejnici a lokálními klimatickými vlivy. Je tedy možno se k této teplotě jen přiblížit. Zásadní pro přesnost je množství měřených bodů na povrchu kolejnice. S přibývajícím počtem měřených bodů se přesnost měření teploty zvyšuje. Každou hodinu se teplota měřila na třech bodech kolejnice (vždy na zastíněné stojině) a hodnoty se před uvedením do tabulky protokolu o zkoušce zprůměrovaly.

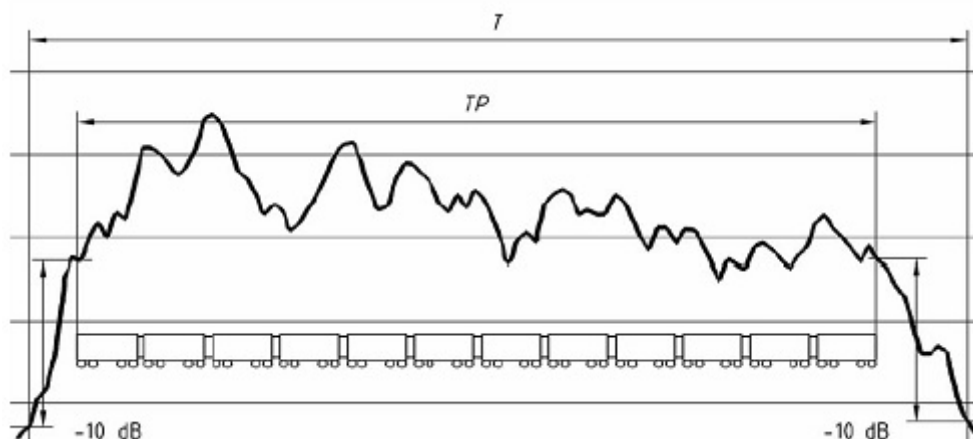
4.2.5.4 Měření rychlosti vlaků

Kromě dynamických charakteristik vibrací a posunů je potřeba zaznamenat také rychlost projíždějících vlakových souprav. Právě rychlost určuje, jakým způsobem se budou rozvíjet vibrace a je tak jednou z klíčových vlastností podle kterých můžeme určit srovnatelné soupravy. Pro měření rychlosti byl využit radarový rychloměr Bushnell.

4.2.5.5 Časový interval měření

Požadavek na časový interval měření je součástí normy ČSN EN ISO 3095. Měření akusticko-dynamických parametrů začíná ve chvíli, kdy vážená hladina akustického tlaku A dosáhne hodnoty o 10 dB nižší, než hladina zjištěná v okamžiku, kdy se čelo vlaku nachází před místem mikrofonu. Analogicky je pak měření ukončeno ve chvíli, kdy hladina akustického tlaku A klesne o 10 dB oproti hladině A změřené v okamžiku, kdy je konec vlaku před měřicím profilem. Doba mezi těmito dvěma mezními okamžiky pak udává časový interval měření.

Čas začátku a konce vlaku byl zachycen pomocí aplikace webkamery, která v průběhu měření snímala průjezdy vlakových souprav. Kamera byla umístěna v ose mikrofonů, tedy kolmo k ose koleje. Systémově byla propojena s programem DEWESoft, čímž byl umožněn přesný záznam průjezdu vlaků. Současně s tím bylo čelo a konec vlaku zaznamenáno v měřených datech impulsní značkou pomocí klávesových zkratk ústředny. Pro vyhodnocení měření byly signály na základě uvedených požadavků ořezány a výpočty byly provedeny jen z těchto oříznutých hodnot. Příklad určení časového intervalu měření je na obr. 4-12.



T_p doba průjezdu vlaku nebo ucelené jednotky

T časový interval měření

Obr. 4-12 Časový interval měření akusticko-dynamických parametrů trati; zdroj: [65]

4.2.5.6 Stanovení hluku pozadí

Hladina akustického tlaku pozadí A musí být při typové zkoušce minimálně o 10 dB nižší než hodnota hladiny akustického tlaku A odpovídající projíždějícímu vozidlu při hluku pozadí. Tento rozdíl 10 dB musí být při frekvenční analýze zajištěn v každém frekvenčním pásmu.

Pro kontrolní zkoušky je pravidlo benevolentnější, hladina akustického tlaku pozadí A musí být nižší alespoň o 5 dB než hladina A zjištěná měřením hluku vyzařovaného vozidlem. Tato podmínka musí být splněna vždy. Je-li rozdíl těchto hladin menší než 10 dB, je zapotřebí naměřenou hodnotu korigovat dle tab. 4-5.

Rozdíl mezi hladinou akustického tlaku A zjištěnou při měření hluku vyzařovaného vozidlem při hluku pozadí a vlastní hladinou akustického tlaku A pozadí [dB]	Korekce, která se má přičíst k hladině akustického tlaku A zjištěné při měření hluku vyzařovaného vozidlem při hluku pozadí [dB]
> 10	0
6 ÷ 9	-1
5	-2

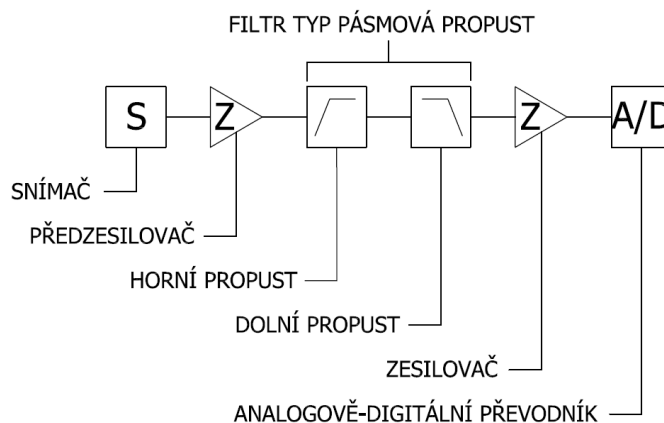
Tab. 4-5 Korekce hladin akustického tlaku A při hluku pozadí; zdroj: autor

5. Matematický aparát

5.1 Měření technického signálu

S rozvojem počítačových technologií se v praktických postupech uplatňují zařízení spojující měřicí a výpočetní techniku. Měření tohoto charakteru se stále více realizují jako digitální, což s sebou přináší řadu výhod. Jednou z těch největších je pak možnost archivace naměřených hodnot. Další výhodou spočívá v možnosti relativně jednoduché změny v organizaci měření a vyhodnocování získaných dat. Jistou nevýhodou převodu analogového signálu na digitální je nemožnost měření signálu spojitě, nýbrž jen v diskretních bodech, tj. ve zvolených časových okamžicích.

Před měřením a zpracováním analogových veličin je nutné vytvořit měřicí řetězec, na jehož počátku je prostředí s měřenými vzruchy (zrychlení, akustický tlak atd.) a na konci pak počítač s vhodným softwarovým rozhraním umožňující zpracování naměřených hodnot. Zjednodušené schéma měřicího řetězce je znázorněno na obr. 5-1.



Obr. 5-1 Zjednodušený měřicí řetězec; zdroj: autor

Digitalizací signálu nazýváme aproximaci reálné hodnoty analogového signálu vhodně zvolenou celočíselnou hodnotou. Posloupnost takto získaných hodnot lze uložit v počítači ve formě např. datového souboru a dále ji zpracovávat pomocí standardních nebo jiných metod. Převod spojitého (analogového) signálu na diskretní (digitální) sestává ze dvou následujících fází [7, 68, 69]:

- vzorkování signálu (sampling);
- kvantování signálu (quantization).

5.1.1 Vzorkování signálu

Vzorkování signálu (diskretizace) spočívá ve vytvoření posloupností hodnot, z nichž každá hodnota je výsledkem digitalizace signálu v jistém časovém okamžiku. Volba okamžiků vzorkování může být různá, obvykle se však používá periodického vzorkování, kde časový interval mezi dvěma následujícími vzorky je konstantní a nazývá se perioda vzorkování Δt [s]. Vzorkovací frekvenci f_{vz} [Hz] pak obdržíme ze vztahu:

$$f_{vz} = \frac{1}{\Delta t}, \quad (5-1)$$

kde:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i. \quad (5-2)$$

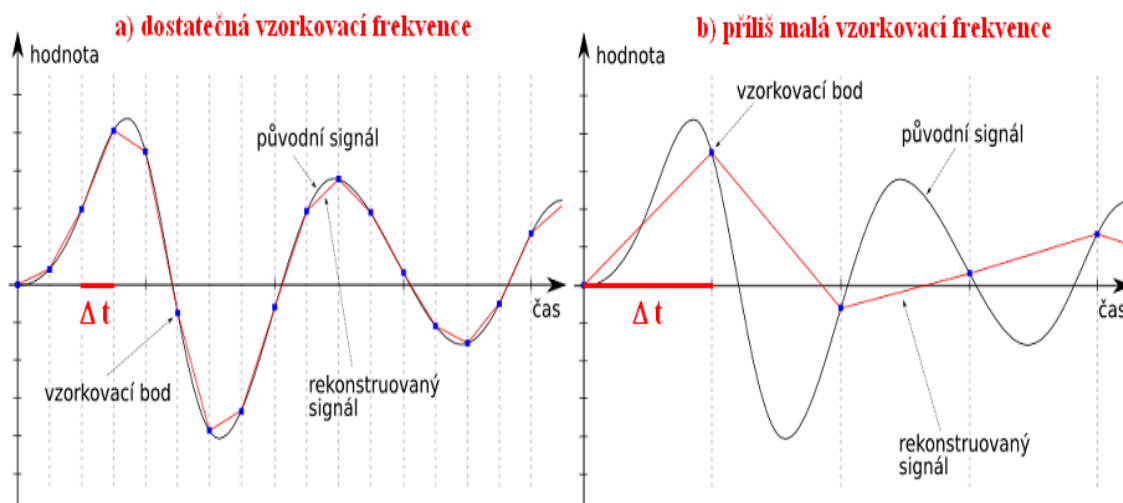
Při volbě periody vzorkování je třeba splnit tzv. Shannonův-Kotělnikovův vzorkovací teorém. Je to proto, aby z naměřených hodnot bylo možné zpětně rekonstruovat původní správné spojité průběhy. Tento teorém říká, že vzorkovací frekvence f_{vz} [Hz] musí být alespoň dvakrát vyšší, než je nejvyšší harmonická složka zastoupená v měřeném signálu:

$$f_{vz} \geq 2 \cdot f_{\max}, \quad (5-3)$$

kde f_{\max} [Hz] je maximální frekvenční složka obsažená v signálu. V praktických aplikacích je doporučeno volit vzorkovací frekvenci minimálně 2,5 násobně vyšší, než je maximální sledovaná frekvenční složka signálu.

Vyskytují-li se v signálu i frekvence, jejichž hodnota je vyšší, než polovina vzorkovací frekvence (také známá jako Nyquistova frekvence), může nastat tzv. aliasing efekt. Důsledkem aliasing efektu je to, že navzorkovaný a uložený signál neodpovídá skutečnosti, resp. nelze snadno provést správnou aproximaci mezi digitalizovanými hodnotami signálu. Pro Nyquistovu frekvenci f_{Nyq} [Hz] platí:

$$f_{Nyq} = \frac{f_{vz}}{2}. \quad (5-4)$$

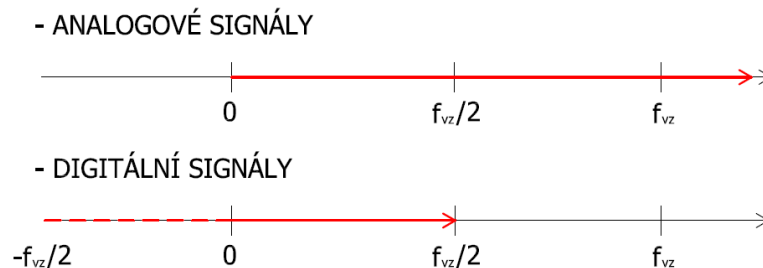


Obr. 5-2 Volba vzorkovací frekvence f_{vz} ; zdroj: autor

U analogových signálů nejsou frekvence ničím omezeny, zatímco u digitálních signálů lze pracovat pouze se signály ve frekvenčním rozsahu 0 až $\frac{1}{2} \cdot f_{vz}$. Digitální signály s frekvencí vyšší než $\frac{1}{2} \cdot f_{vz}$ neexistují. Budeme-li vzorkovat signál s frekvencí větší než $\frac{1}{2} \cdot f_{vz}$, tak dojde k následnému přeložení frekvence na novou hodnotu f_a [Hz] ležící v intervalu $\langle -\frac{1}{2} \cdot f_{vz}, +\frac{1}{2} \cdot f_{vz} \rangle$ podle vztahu:

$$f_a = f_0 - k \cdot f_{vz} \in \left(-\frac{1}{2} f_{vz}, +\frac{1}{2} f_{vz}\right). \quad (5-5)$$

Vyšší frekvence obsažené v měřeném signálu je možno odstranit ve fázi úpravy signálu pomocí vhodného analogového filtru typu dolní propust. Digitálním filtrem tuto úpravu nelze prakticky provést.

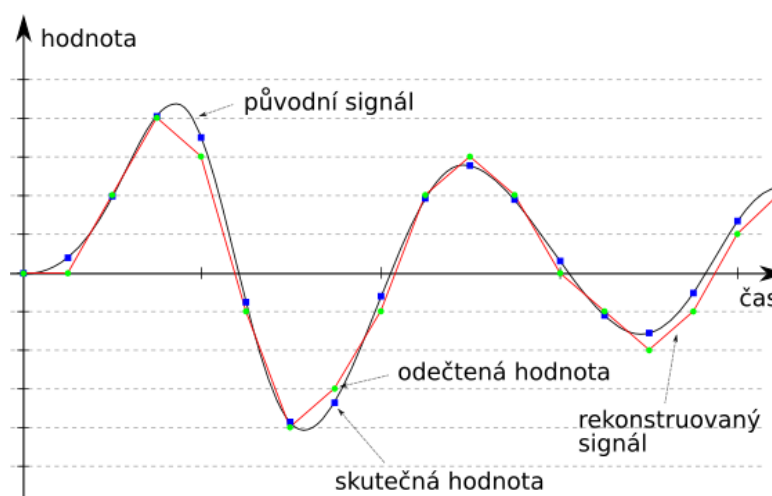


Obr. 5-3 Frekvenční omezení signálů; zdroj: autor

5.1.2 Kvantování signálu (A/D převodník)

Kvantování signálu spočívá v zobrazení hodnoty ze spojitého vstupního intervalu (analogové veličiny) do konečné množiny diskretních hodnot. Část vstupního intervalu, která se celá zobrazí do jedné diskretní hodnoty, odpovídá jednotce kvantování – maximální absolutní chybě, které se touto aproximací můžeme dopustit. Jednotka kvantování určuje zároveň maximální rozlišovací schopnost daného převodníku. Pro chybu kvantování je určující počet kvantizačních úrovní n . Jelikož se digitální signál povětšinou zpracovává na zařízeních pracujících ve dvojkové číselné soustavě, bývají počty kvantizačních úrovní A/D převodníků zpravidla rovny mocnině 2^n , přičemž rozlišení kvantovaného signálu pak lze vyjádřit v n bitech.

Současné měřicí ústředny obsahují zpravidla již 24-bitové A/D převodníky. Chyba z kvantování je proto často menší, než rozlišovací schopnost použitých čidel. 24-bitový A/D převodník je teoreticky schopný rozdělit diskretní signál na 16 777 216 hodnot, což např. při maximálním měřicím rozsahu snímače $0 \div 7\,000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ znamená teoretickou přesnost $4,17 \cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

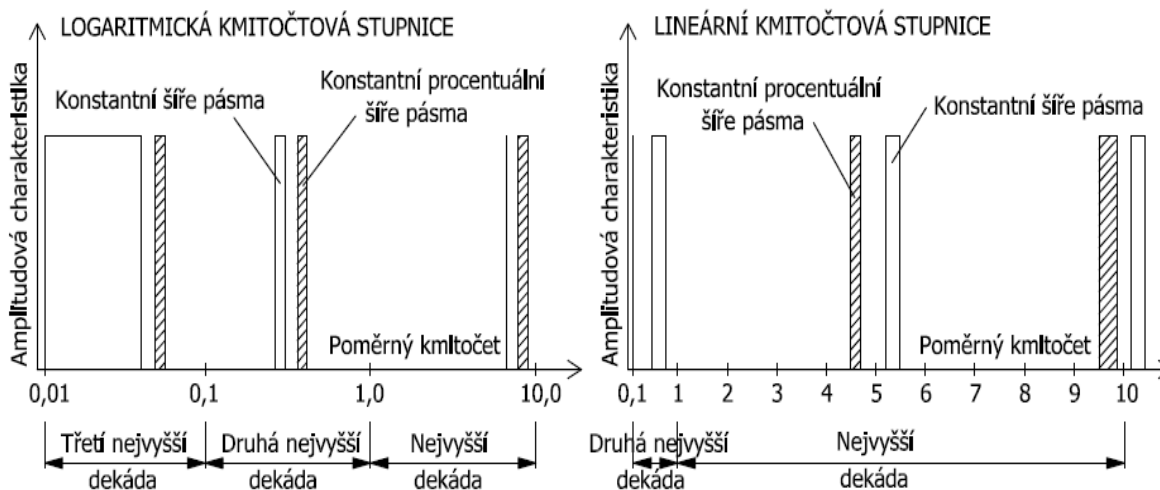


Obr. 5-4 Kvantování signálu; zdroj: autor

5.1.3 Filtrování signálu

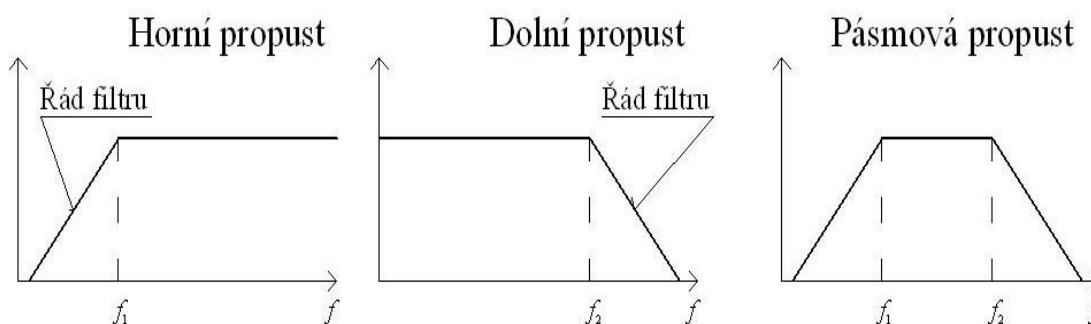
Při měření hluku a vibrací nás nezřídka zajímá, jak velkých amplitud zkoumaný jev dosahuje na určitých kmitočtech nebo kmitočtových pásmech. Frekvenční složení signálu může být při měření získáno pomocí pásmových filtrů, které propustí od mikrofону resp. snímače zrychlení mechanického kmitání do vyhodnocovacího bloku přístroje pouze signály požadované frekvence. Pro kmitočtovou analýzu principiálně rozeznáváme pásmové propusti:

- s procentuálně konstantní šíří pásma vzhledem ke střednímu kmitočtu v pásmu;
- s konstantní šíří pásma, která nezávisí na středním kmitočtu pásma.



Obr. 5-5 Nastavení pásmových propustí; zdroj: autor

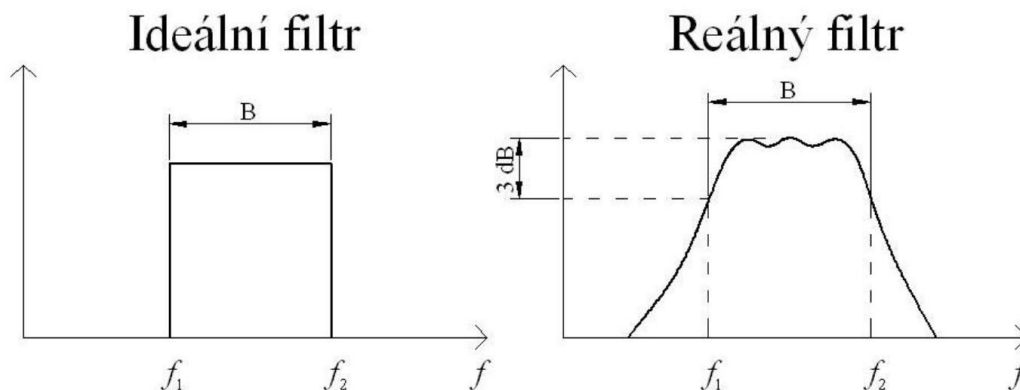
Filtr se při měření používá k potlačení velmi nízkých frekvencí (horní propust) a vysokých frekvencí (dolní propust). Použijí-li se oba filtry zároveň, pak hovoříme o pásmové propusti. Sklon filtru nám udává tzv. řád filtru. Čím vyšší je řád filtru, tím je filtr tvrdší a tím méně frekvencí pod nebo nad filtr propustí. Jednotlivé typy filtrů jsou znázorněny na obr. 5-6.



Obr. 5-6 Základní typy filtrů; zdroj: [70]

Kmitočtové složky spojitého signálu mají sice teoreticky nekonečně malou kmitočtovou šířku df , ale v praxi, kdy je nutno průběh signálu rozložit na malé úseky (diskrétní body), je kmitočtová šířka závislá na přenosových vlastnostech užitých pásmových filtrů. Charakteristika ideálního pásmového filtru je vidět na obr. 5-7 vlevo. Takový filtr přenesou frekvenční složky signálu bez zeslabení pouze z kmitočtového pásma $\langle f_1, f_2 \rangle$. Ideální filtr však neexistuje a tak se u reálných filtrů definuje jejich šířka B , viz obr. 5-7 vpravo. Skutečná

šířka B pásové propusti je oproti ideálnímu filtru zvětšena o 3 dB pásmo zohledňující právě přenosové charakteristiky reálného filtru.



Obr. 5-7 Přenosové charakteristiky pásmového filtru; zdroj: [70]

5.2 Zvolené metody zpracování

Při měření dynamických účinků od kolejových vozidel v terénu nebo od budícího impulsu v laboratoři, je zapotřebí popsat a vyhodnotit stochastický a přechodový signál. Práce s takovými signály může být poměrně obtížná a jejich objektivní hodnocení vyžaduje použití moderních matematických postupů. Metody a parametry hodnocení naměřeného signálu lze rozčlenit do tří následujících oblastí:

- časové zobrazení pohybů kolejového roštu a průběhu kmitání, dále extrémů pohybů kolejového roštu a kmitání, efektivní hodnoty kmitání a další statistické veličiny (střední hodnota, crest faktor, medián, n -procentní kvantil, apod.) nebo standardizované deskriptory hluku;
- frekvenční analýza hluku a vibrací s využitím průběhu amplitudového spektra – pro přechod z časové do frekvenční oblasti je využit algoritmus rychlé Fourierovy transformace či dalších průměrovacích metod založených na aplikacích rychlé Fourierovy transformace, jako jsou např. algoritmus Welchovy metoda nebo různé typy frekvenčních přenosových funkcí;
- časově-frekvenční spektrální analýza vibrací – pro přechod z časové do časově-frekvenční oblasti lze použít algoritmy lineárních či nelineárních transformací. Zásadní výhodou první skupiny je zejména rychlost výpočtu a uspokojující časově frekvenční rozlišení. Hlavní nevýhodou lineárních transformací je skutečnost, že výsledné rozlišení v čase a frekvenci je limitováno tzv. Heisenbergovým principem neurčitosti. Mezi nejznámější časově-frekvenční transformace patří metoda Krátkodobé Fourierovy transformace a transformace Wavelet. Z nelineárních metod byly teoreticky popsány a k praktickému vyhodnocení využity jednak časově-frekvenční transformace z Cohenovy třídy (konkrétně transformace Wigner-Villeho, Rihaczek, Page, Born-Jordanova a Margenau-Hillova) a jednak afinní časově-frekvenční transformace (konkrétně Bertrandova, D-Flandrinova a Unterbergerova transformace). Výsledné rozlišení všech nelineárních transformací není limitováno Heisenbergovým principem neurčitosti. Jistou nevýhodou těchto

nelineárních postupů je však časová náročnost výpočtu a nároky na relativně velkou operační i diskovou paměť počítače. Další nevýhodou některých nelineárních transformací při zpracování určitých typů časových realizací může být existence „falešných“ interferenčních frekvenčních komponent. Jejich vliv je možné zmírnit vhodnou volbou tzv. jádrové funkce, případně použitím tzv. vyhlazené transformace, kdy vlastnosti dané nelineární transformace se ovlivní použitím vhodné lokální okénkové funkce.

Metody časového zobrazení poskytují užitečné prvotní informace o testovaném signálu. Z hlediska analýzy pohybů kolejového roštu se jedná o plnohodnotné informace. Pro podrobnou analýzu a rozbor hluku a vibrací jsou však tyto informace nedostačující, neboť neodkrývají frekvenční složení signálu. Z tohoto důvodu je vhodné převedení signálu z roviny časové do roviny frekvenční. Ve frekvenční oblasti je možné provést rozbor jednotlivých frekvenčních složek obsažených v hodnoceném signálu. Pro získání dalších informací o daném signálu lze použít ještě třetí rovinu vyhodnocení, a sice rovinu časově-frekvenční. V této rovině je možné sledovat nejen frekvenční složení signálu, ale také výskyt frekvenčních složek v čase. V následující části je popsán použitý matematický aparát.

5.2.1 Analýza v časové oblasti

Základními veličinami, jež charakterizují mechanické chvění, jsou:

- výchylka vibrací y [m];
- rychlost vibrací v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];
- zrychlení vibrací a [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$].

Rychlost kmitání můžeme popsat v porovnání s výchylkou jako fázový předstih $\pi/2$ a zrychlení kmitání jako fázový předstih π . Mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením platí následující vztahy [71]:

$$y = A \cdot \sin \omega t ; \quad (5-6)$$

$$v = A \cdot \omega \cdot \cos \omega t ; \quad (5-7)$$

$$v = \frac{du}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos \omega t ; \quad (5-8)$$

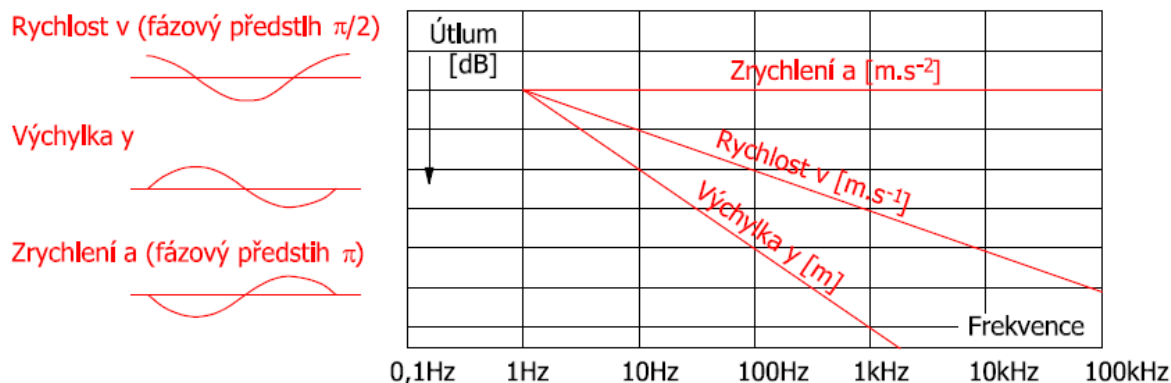
$$v = A \cdot \omega = A \cdot 2\pi \cdot f ; \quad (5-9)$$

$$a = \frac{d^2u}{dt^2} = A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t ; \quad (5-10)$$

$$a = A \cdot \omega^2 = A \cdot 4\pi^2 \cdot f^2 . \quad (5-11)$$

A [m] je amplituda, ω [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] je úhlová rychlost nebo také úhlová frekvence a t [s] je čas. Volba dané veličiny závisí především na charakteru měření. Z hlediska frekvenční analýzy je pro oblast nízkých kmitočtů (řádově jednotky Hz) určující měření výchylky a naopak, pro vysokofrekvenční složky je vhodné vyhodnocovat zrychlení [72]. Z hlediska fyzikálních

účinků na stavební konstrukce se považuje za zásadní rychlost kmitání. Byl prokázán příčinný vztah mezi dynamickými účinky v nesoudržných materiálech pražcového podloží a rychlostí kmitání, který je téměř nezávislý na frekvenci kmitání. Při určitých rychlostech kmitání dochází k náhlému poklesu stability a únosnosti nesoudržných zemin, danému výrazným snížením úhlu vnitřního tření materiálu s následným ztekucením.



Obr. 5-8 Závislost veličin mechanického chvění; zdroj: autor

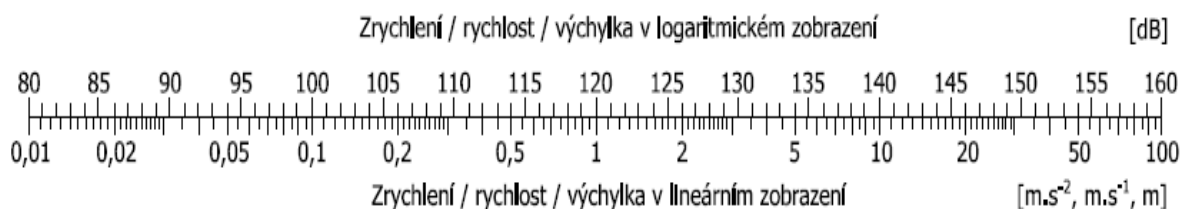
Veličiny charakterizující chvění můžeme také vyjadřovat v bezrozměrných veličinách – decibelech [dB]. K tomu účelu byly zavedeny následující hladiny:

$$\text{Hladina výchylky: } L_y = 20 \cdot \log \frac{y}{y_0} \text{ [dB];} \quad (5-12)$$

$$\text{Hladina rychlosti: } L_v = 20 \cdot \log \frac{v}{v_0} \text{ [dB];} \quad (5-13)$$

$$\text{Hladina zrychlení: } L_a = 20 \cdot \log \frac{a}{a_0} \text{ [dB].} \quad (5-14)$$

Veličiny y_0 , v_0 , a_0 představují tzv. referenční hodnoty výchylky, rychlosti a zrychlení kmitání. Jsou smluvně definovány velikostí $y_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, $v_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $a_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Je zde vhodné podotknout, že obdobný princip funguje také u základních deskriptorů hluku. Závislosti mezi lineárním a decibelovým vyjádřením základních veličin mechanického chvění jsou patrné z obr. 5-9.



Obr. 5-9 Lineární a logaritmické zobrazení veličin mechanického kmitání; zdroj: autor

V akustice jsou základními decibelovými veličinami [41]:

- hladina akustického výkonu L_w [dB];
- hladina akustického tlaku L_p [dB];
- hladina intenzity zvuku L_I [dB].

$$L_w = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} ; \quad (5-15)$$

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} ; \quad (5-16)$$

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} ; \quad (5-17)$$

$$L_I = L_p - 0,2 \cong L_p ; \quad (5-18)$$

$$L_I \cong L_p = L_w - 10 \cdot \log S . \quad (5-19)$$

P [W] je sledovaný akustický výkon, $P_0 = 10^{-12}$ W je referenční hodnota akustického výkonu, p [Pa] je efektivní hodnota sledovaného akustického tlaku, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa je referenční hodnota akustického tlaku, I [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je intenzita zvuku sledovaného akustického signálu a $I_0 = 10^{-12}$ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ je referenční hodnota intenzity zvuku. Z rovnic (5-15) až (5-17) je zřejmé, že každému zvýšení akustického výkonu a intenzity zvuku o jeden řád odpovídá zvýšení hladiny akustického výkonu a hladiny intenzity zvuku o 10 dB. Každému zvýšení akustického tlaku o jeden řád pak odpovídá zvýšení hladiny akustického tlaku o 20 dB. Za referenční hodnotu akustického tlaku p_0 byla zvolena minimální hodnota akustického tlaku, kterou je ještě schopen zaznamenat zdravý lidský sluchový orgán. Ze vztahu (5-18) pak vyplývá, že hladina akustického tlaku L_p a hladina intenzity zvuku L_I jsou přibližně stejné. Rovnice (5-19) definuje, že hladina akustické intenzity (popř. hladina akustického tlaku) klesá s rostoucí vzdáleností od bodového zdroje zvuku s hladinou akustického výkonu L_w . Může za to rostoucí plocha S [m^2], která zde představuje měřicí plochu s intenzitou zvuku I .

5.2.1.1 Kvantitativní hodnocení amplitud chvění

Amplitudy mechanického chvění, určující přímo jeho nebezpečnost a škodlivost, je možno kvantitativně hodnotit několika způsoby, např. [69]:

- maximální rozkmit (peak – peak);
- vrcholová hodnota (peak);
- střední hodnota (average);
- efektivní hodnota (RMS – Root Mean Square);
- crest faktor.

Maximální rozkmit je výhodné použít zejména tam, kde je z hlediska maximálního přípustného mechanického namáhání důležitá výchylka chvění.

Vrcholová hodnota nejlépe popisuje amplitudy krátkodobých jevů, jako jsou mechanické rázy apod. Vrcholová hodnota však pouze indikuje přítomnost špičky, neodráží časový průběh ani kmitočtové složení hodnoceného chvění. Hodnocení minim a maxim může odhalit tzv. plochá kola, případně nápravu, nebo podvozek vozidla, který vykazuje oproti ostatním nestandardní chování. Také určí maximální špičkové hodnoty interakčních sil působících na kontaktu kolo-kolejnice, převedené a zachycené ve formě zrychlení vibrací.

Střední (absolutní) hodnota $E(X)$ proměnné veličiny X sice poskytuje představu o časovém průběhu, avšak její praktický význam je značně omezený. Nemá přímý vztah k žádné důležitější fyzikální veličině. Absolutní střední hodnotu lze vyjádřit vztahem:

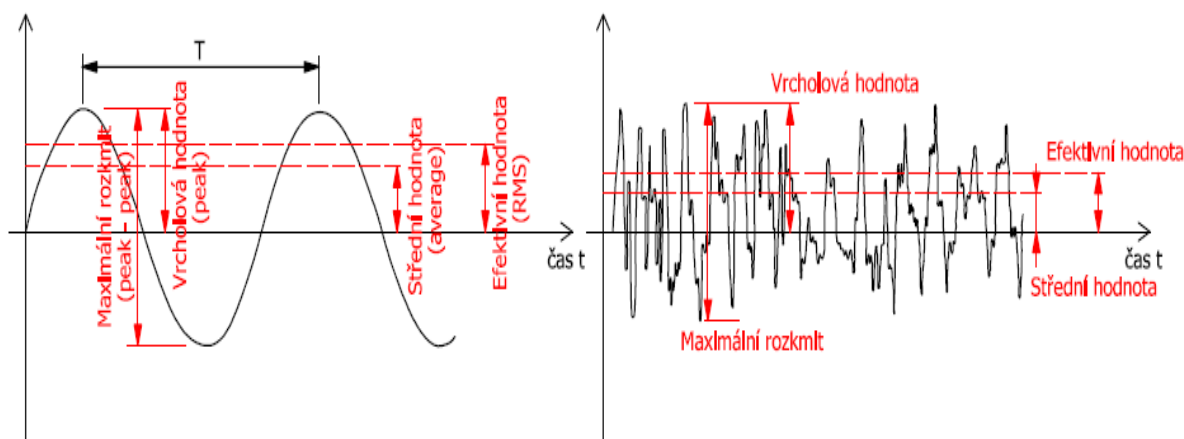
$$E(X) = \frac{1}{T} \int_0^T |x| \cdot dt, \quad (5-20)$$

kde x je okamžitá hodnota sledované veličiny a T [s] je doba, pro kterou je absolutní střední hodnota určena.

Efektivní hodnota RMS je z hlediska hodnocení nejdůležitější, protože odráží časový průběh amplitud chvění a zároveň má přímý vztah k jeho energetickému obsahu. Je tedy měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti dané veličiny. Efektivní hodnotu zrychlení kmitání a_{ef} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] lze popsat následovně:

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) \cdot dt}, \quad (5-21)$$

kde $a(t)$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] je okamžitá hodnota zrychlení kmitání a T [s] je doba, pro kterou je efektivní hodnota RMS určena.



Obr. 5-10 Grafické znázornění vztahu mezi jednotlivými způsoby kvantitativního hodnocení amplitud chvění; zdroj: autor

Crest faktor $C(X)$ [-] nám vyjadřuje poměr mezi vrcholovou a efektivní hodnotou proměnné veličiny X . Crest faktor zrychlení kmitání je možné definovat jako:

$$C(a) = \frac{|a_{peak}|}{a_{ef}}. \quad (5-22)$$

5.2.1.2 Ekvivalentní trvalá vážená hladina akustického tlaku $L_{pAeq,T}$

Ekvivalentní trvalá vážená hladina akustického tlaku $L_{pAeq,T}$ [dB(A)] je taková vážená hodnota hladiny akustického tlaku A spojitého stálého zvuku, která ve specifikovaném časovém intervalu T má tutéž hodnotu druhé mocniny akustického tlaku jako posuzovaný zvuk, jehož hladina se v čase mění. Tato hladina je dána vztahem [66, 73, 74]:

$$L_{pAeq,T} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right], \quad (5-23)$$

kde T [s] je časový interval měření, po který probíhá výpočet, $p_A(t)$ [Pa] je okamžitý vážený akustický tlak A a p_0 [Pa] je referenční hodnota akustického tlaku podle ČSN ISO 1996-1.

5.2.1.3 Ekvivalentní trvalá vážená hladina akustického tlaku za dobu průjezdu $L_{pAeq,Tp}$

Ekvivalentní trvalá vážená hladina akustického tlaku za dobu průjezdu $L_{pAeq,Tp}$ [dB(A)] je taková vážená hodnota hladiny akustického tlaku A spojitého stálého zvuku, která ve specifikovaném časovém intervalu T_p má tutéž hodnotu druhé mocniny akustického tlaku jako posuzovaný zvuk, jehož hladina se v čase mění. Tato hladina je dána vztahem [66, 73, 74]:

$$L_{pAeq,Tp} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right], \quad (5-24)$$

kde $T_p = T_2 - T_1$ [s] je časový interval měření průjezdu začínající v T_1 a končící v T_2 , viz obr. 4-12, $p_A(t)$ [Pa] je okamžitý vážený akustický tlak A a p_0 [Pa] je referenční hodnota akustického tlaku podle ČSN ISO 1996-1.

5.2.1.4 Hladina jednorázové expozice hluku SEL

Hladina jednorázové expozice hluku SEL [dB(A)] je vážená hladina hluku A jednotlivé události měřená po časový interval T a normalizovaná na $T_0 = 1$ s. Časový interval T je tak dlouhý, aby mohl zahrnout veškerou akustickou energii dané události v bodech alespoň do 10 dB pod nižší hodnotou L_{pA} během časového intervalu T . SEL je dána vztahem [66, 73]:

$$SEL = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T_0} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right], \quad (5-25)$$

kde $T_0 = 1$ s je referenční časový interval, T [s] je časový interval měření, po který probíhá výpočet, $p_A(t)$ [Pa] je okamžitý vážený akustický tlak A a p_0 [Pa] je referenční hodnota akustického tlaku podle ČSN ISO 1996-1.

Hladina jednotlivé události SEL má vazbu na ekvivalentní trvalou váženou hladinu akustického tlaku $L_{pAeq,T}$, podle následujícího vztahu:

$$SEL = L_{pAeq,T} + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{T_0} \right). \quad (5-26)$$

5.2.1.5 Hladina expozice průjezdu TEL

Hladina expozice průjezdu TEL je vážená hladina expozice hluku A průjezdu vlaku, měřená v časovém intervalu T a normalizovaná na dobu průjezdu T_p . Časový interval T je tak dlouhý, aby mohl zahrnout veškerou akustickou energii dané události v bodech alespoň

do 10 dB pod nižší hodnotou L_{pA} během časového intervalu T . TEL je dána následujícím vztahem [66, 73]:

$$TEL = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T_p} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right], \quad (5-27)$$

kde T_p [s] je doba průjezdu vlaku, což odpovídá celkové délce vlaku [m] dělené jeho jízdní rychlostí V [$m \cdot s^{-1}$], T [s] je časový interval měření, $p_A(t)$ [Pa] je okamžitý vážený akustický tlak A a p_0 [Pa] je referenční hodnota akustického tlaku podle ČSN ISO 1996-1.

Hladina expozice průjezdu TEL má vazbu na hladinu jednotlivé události SEL a na ekvivalentní hladinu akustického tlaku $L_{pAeq,T}$ podle následujících vztahů:

$$TEL = SEL + 10 \cdot \log \left(\frac{T_0}{T_p} \right); \quad (5-28)$$

$$TEL = L_{pAeq,T} + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{T_p} \right), \quad (5-29)$$

kde $T_0 = 1$ s je referenční časový interval.

5.2.2 Analýza ve frekvenční oblasti

Spektrální analýza slouží k popisu signálu pomocí jeho složek ve frekvenční oblasti. Matematickým základem postupů, jimiž se získává z časového průběhu signálu spektrum nebo spektrální hustota, jsou ortogonální transformace. Spektrum signálů je komplexní funkce reálné proměnné (frekvence). Protože jde o komplexní funkci, zavádí se na základě souvislosti s kartézským tvarem komplexních čísel pojmy reálná a imaginární část spektra, eventuálně amplitudové a fázové spektrum. Dalším rozšířením pojmu spektrum je energetická nebo výkonová spektrální hustota, jež popisuje rozdělení (distribuci) hustoty energie resp. hustoty výkonu signálu v závislosti na frekvenci. Spektrální hustota výkonu se získá normováním hodnoty průměrného výkonu signálu šířkou frekvenčního pásma, ve kterém je signál měřen. Metody spektrální analýzy lze rozdělit do tří skupin [7, 69]:

- klasické neparametrické metody založené na diskrétní Fourierově transformaci nebo její modifikaci;
- ostatní neparametrické metody;
- parametrické metody založené na popisu signálu pomocí vypočtených parametrů.

5.2.2.1 Fourierova transformace (FT)

Fourierova transformace je nejčastěji užívanou metodou pro převod z časové do frekvenční oblasti. Jak již bylo naznačeno, jedná se o klasickou neparametrickou metodu spektrální analýzy. Celá analýza se tedy opírá pouze o změřená data. Nejsou vytvářeny žádné modely vzniku a predikce signálu. Fourierova transformace je pro spojitou funkci definována následujícími integrálními rovnicemi:

$$\text{Přímá transformace: } X(f) = k_1 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot dt ; \quad (5-30)$$

$$\text{Zpětná transformace: } x(t) = k_2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi ft} \cdot df , \quad (5-31)$$

kde f [Hz] je frekvence, t [s] čas, $x(t)$ signál v časové oblasti a $X(f)$ jeho reprezentace ve frekvenční oblasti, k_1 a k_2 jsou konstanty.

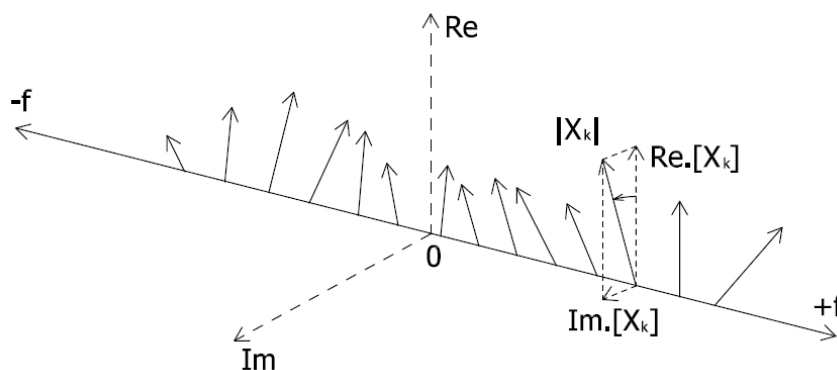
5.2.2.2 Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

Pracuje-li se s digitalizovaným signálem, je nutno integrální rovnice (5-30) a (5-31) modifikovat do následujících vztahů:

$$\text{Přímá transformace: } X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j(\frac{2\pi kn}{N})} ; \quad (5-32)$$

$$\text{Zpětná transformace: } x_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j(\frac{2\pi kn}{N})} , \quad (5-33)$$

kde x_n je hodnota n -tého prvku diskretní posloupnosti (čas $t = n \cdot \Delta$), X_k je k -tá frekvenční složka signálu, $\Delta = T / N$, T [s] je doba trvání realizace, N je počet prvků naměřené posloupnosti a j je imaginární jednotka. Posloupnost hodnot X_k můžeme nazvat Fourierovými koeficienty. Jedná se o komplexní čísla, která nám dávají úplný obraz o frekvenčním složení signálu. Představují vektory X_k , které rotují okolo frekvenční osy f a jsou graficky znázorněny na obr. 5-11.



Obr. 5-11 Grafické znázornění Fourierových koeficientů; zdroj: [7]

5.2.2.3 Rychlá Fourierova transformace (FFT)

Z definičního vztahu DFT pro záznam s N vzorky vyplývá, že k vyčíslení všech koeficientů X_k je potřeba vykonat N^2 sčítání a N^2 násobení komplexních čísel. Algoritmus výpočtu DFT tak vyžaduje velký počet paměťových polí a velký počet matematických operací. Cooley a Tukey v roce 1965 vypracovali metodu značného urychlení výpočtu, tzv. rychlou Fourierovu transformaci. Podstatou této metody je volba zvláštní délky záznamu:

$$N = 2^m , \quad (5-34)$$

kde m je přirozené číslo. Hodnotám $m = 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13$ odpovídají hodnoty $N = 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192$. Vztah (5-32) se potom v praktických úlohách aplikuje právě pro tyto délky záznamu, čímž se vyloučí velká většina nadbytečných matematických operací.

5.2.2.4 Parsevalův zákon zachování energie

Pro signálovou analýzu je významný Parsevalův zákon zachování energie, který vyjadřuje skutečnost, že energie signálu se transformací nezmění. Pro spojitou oblast je Parsevalův teorém definován vztahem:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 \cdot dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 \cdot df, \quad (5-35)$$

kde E představuje celkovou energii signálu $x(t)$ v časové oblasti a $X(f)$ ve frekvenční oblasti. Pro DFT pak platí vztah:

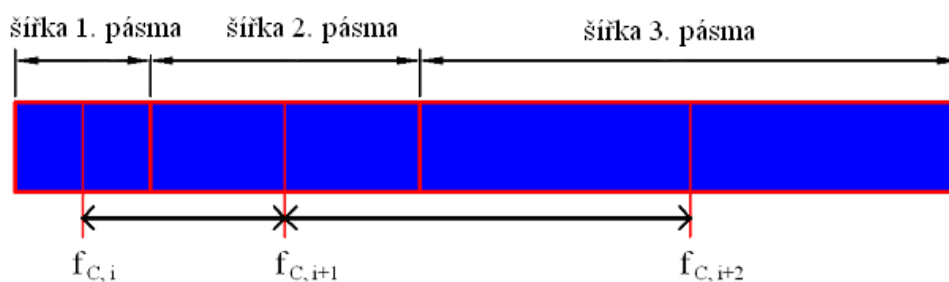
$$E = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n^2 = \sum_{k=0}^{N-1} X_k^* \cdot X_k, \quad (5-36)$$

kde $*$ značí komplexní konjugaci.

5.2.2.5 Oktávová a třetinooktávová analýza

Celé oktávové pásmo (1/1) představuje frekvenční pásmo, kde střední frekvence $f_{c,i+1}$ [Hz] je určena z pásma dvojnásobné šířky, než je šířka pásma, z něž byla určena střední frekvence f_{ci} [Hz]. Pro šířku frekvenčního pásma tedy platí:

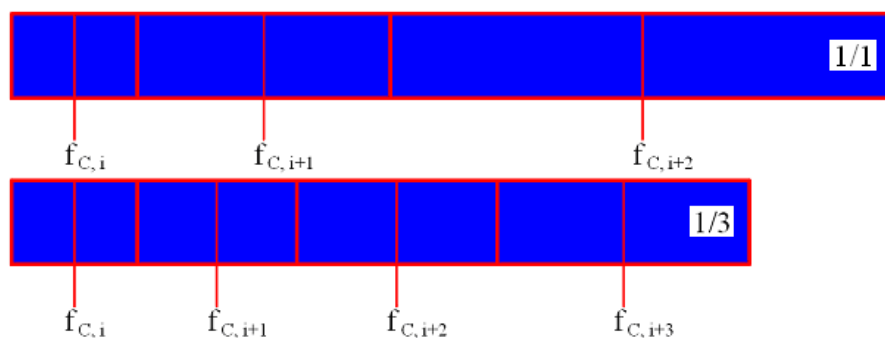
$$f_{c,i+1} = 2 \cdot f_{c,i}. \quad (5-37)$$



Obr. 5-12 Celé oktávové pásmo; zdroj: [70]

Parciální oktávová pásma (1/3, 1/6, 1/12, 1/24,...) představují frekvenční pásma, kde je šířka pásem dána vztahem:

$$f_{c,i+1} = 2^{\frac{1}{x}} \cdot f_{c,i} \text{ pro } x = 3, 6, 12, 24, \dots \quad (5-38)$$



Obr. 5-13 Srovnání celé oktávy s třetinooktávou; zdroj: [70]

Velikost střední frekvence f_c [Hz] se vypočte energetickým sečtením frekvencí, jež spadají do daného frekvenčního pásma podle vztahu:

$$f_c = \sqrt{f_d \cdot f_h}, \quad (5-39)$$

kde f_d [Hz] a f_h [Hz] jsou hraničními frekvencemi příslušného pásma.

5.2.2.6 Váhové filtry

Vzhledem k tomu, že lidský sluch má obecně rozdílnou citlivost při různých frekvencích, používají se váhové filtry A, B, C nebo pro leteckou dopravu D. U váhových filtrů se zavádí tzv. korekce, které jsou přičteny k hladinám hluku na jednotlivých frekvencích. Hladiny hluku jsou tak přepočteny na hodnoty uzpůsobené vjemu lidského sluchu. V mezinárodním měřítku se nejčastěji používá váhový filtr A, který je rovněž doporučen normou ČSN EN ISO 3095. Korekci K_A [dB] váhového filtru A je možné určit ze vztahu:

$$K_A(f) = 20 \cdot \log \frac{R_A(f)}{R_A(1000)}, \quad (5-40)$$

kde

$$R_A(f) = \frac{12200^2 \cdot f^4}{(f^2 + 20,6^2) \cdot (f^2 + 12200^2) \cdot \sqrt{(f^2 + 107,7^2) \cdot (f^2 + 737,9^2)}}. \quad (5-41)$$

Z rovnice (5-40) vyplývá, že při frekvenci $f = 1000$ Hz bude korekce $K_A(1000) = 0$. Předpokládá se, že lidský sluch je při této frekvenci nejcitlivější, proto je i váhový filtr A nastaven s nulovou korekcí.

5.2.2.7 Frekvenční odezvosvá funkce FRF

Frekvenční odezvosvá funkce FRF je specifickým případem přenosové funkce. Jedná se o funkci získanou řezem přenosovou funkcí v komplexní Laplaceově oblasti. Tento řez je rovnoběžný s imaginární osou oblasti. FRF je možné vyjádřit poměrem výstupu ke vstupu, pohybem vůči síle, resp. odezvou na příslušné buzení. Odezvosvé parametry FRF mohou být vyjádřeny formou výchylky, rychlosti nebo zrychlení. FRF vyjadřující poměr výchylky vůči síle se nazývá funkcí receptance (dynamické poddajnosti), která je základní funkcí výpočtové modální analýzy. Inverzí této funkce vyjádříme strukturální dynamickou tuhost. Při aplikaci

experimentální modální analýzy, kdy se pro měření odezvy systému nejčastěji používají akcelerometrické snímače, je praktičtější využití funkce akcelerance, tedy vzájemného vztahu mezi zrychlením a budicí silou. Inverzí funkce akcelerance získáme vztah pro zdánlivou hmotnost zkoumaného systému. Pro převod mezi jednotlivými typy FRF platí základní matematický vztah mezi výchylkou y [m], rychlostí v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] a zrychlením a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]:

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}. \quad (5-42)$$

Konstrukci železničního svršku si lze představit jako viskózně tlumenou soustavu o jednom stupni volnosti s vynuceným kmitáním, která je charakterizována svojí pružností k [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$], tlumením c [$\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1}$] a hmotností m [kg]. Chování této soustavy je popsáno následující diferenciální rovnicí pro neznámou funkci posunutí $w(t)$ [m]:

$$m \frac{d^2 w(t)}{dt^2} + c \frac{dw(t)}{dt} + kw = F(t). \quad (5-43)$$

Nalezení řešení v časové oblasti je obtížné. Pro jednoduché funkce $F(\tau)$ je možné jej nalézt při použití funkce odezvy na jednotkový impuls $h(\tau)$ ve tvaru:

$$w(t) = \int_0^t h(\tau) F(t - \tau) d\tau. \quad (5-44)$$

Volí se cesta nalezení funkce frekvenční odezvy $H(f)$ pomocí Fourierových transformací. Tato funkce popisuje vztah mezi odezvou a buzením ve frekvenční oblasti. Známe-li časový průběh zatížení, provede se její Fourierova transformace a odezva ve frekvenční oblasti $W(f)$ se vypočte násobením funkcí frekvenční odezvy:

$$W(f) = H(f) \cdot F(f). \quad (5-45)$$

Funkce frekvenční odezvy pro soustavu s jedním stupněm volnosti je definována vztahem [8, 75]:

$$H(f) = \frac{W(f)}{F(f)} = \frac{\frac{1}{k}}{1 - \frac{f^2}{f_n^2} + i \cdot 2\beta \frac{f}{f_n}}, \quad (5-46)$$

kde f_n [Hz] jsou netlumené vlastní frekvence a β [-] je poměrný útlum soustavy:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (5-47)$$

$$\beta = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}}. \quad (5-48)$$

Dosazením za $f = 0$ Hz získáme ze vzorce (5-46) vztah pro statické hodnoty:

$$H(0) = \frac{1}{k}. \quad (5-49)$$

V polárních komplexních souřadnicích lze napsat funkci (5-46) jako součin faktoru zisku $|H(f)|$ a fázového posunu $\Phi(f)$:

$$H(f) = |H(f)|e^{-i\phi(f)}, \quad (5-50)$$

kde je:

$$|H(f)| = \frac{\frac{1}{k}}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_n^2}\right)^2 + 4\beta^2 \cdot \frac{f^2}{f_n^2}}}, \quad (5-51)$$

$$\phi(f) = -\arctan \frac{2\beta \cdot \frac{f}{f_n}}{1 - \frac{f^2}{f_n^2}}. \quad (5-52)$$

I když je pouze velmi málo praktických struktur, které mohou být realisticky modelovány systémem s jedním stupněm volnosti SDOF (Single Degree of Freedom), vlastnosti takového systému jsou velmi důležité, protože vlastnosti složitějšího systému s více stupni volnosti MDOF (Multi Degree of Freedom) mohou být vždy vyjádřeny jako lineární superpozice mnoha SDOF charakteristik [76].

5.2.3 Analýza v časově-frekvenční oblasti

Fourierova transformace, její modifikace a některé parametrické metody jsou techniky zvláště vhodné ke zpracování stacionárních (nejlépe ergodických nebo periodických) signálů. Mohou být využity i pro analýzu nestacionárních signálů, pokud nás zajímají pouze frekvenční komponenty obsažené v celém signálu. Nedávají nám přehled o časovém výskytu frekvenčních složek. Pro určení časové lokalizace frekvenčních komponent, je nutné využít jiné transformační postupy a jiné výpočetní metody. Jedním z možných postupů, jak analyzovat časový výskyt frekvenčních složek nestacionárních signálů, je použití jisté modifikace FT, nazývané okénková Fourierova transformace [69].

5.2.3.1 Okénková Fourierova transformace STFT (Short Time Fourier Transform)

STFT lokalizuje frekvenční složky v čase s konstantním rozlišením. Jedná se tedy o lineární časově-frekvenční transformaci. Základním principem je rozdělení signálu na dostatečně malé realizace, u nichž je možno předpokládat dostatečnou stacionaritu (ergodicitu). To je provedeno multiplikací jisté okénkové funkce a signálu. Na každém takovém výřezu je provedena Fourierova transformace. Okénko se posouvá v čase. Definiční integrál STFT je:

$$STFT_X^{(\omega)}(t', f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) \cdot g^*(t - t')] \cdot e^{-j2\pi f(t-t')} \cdot dt, \quad (5-53)$$

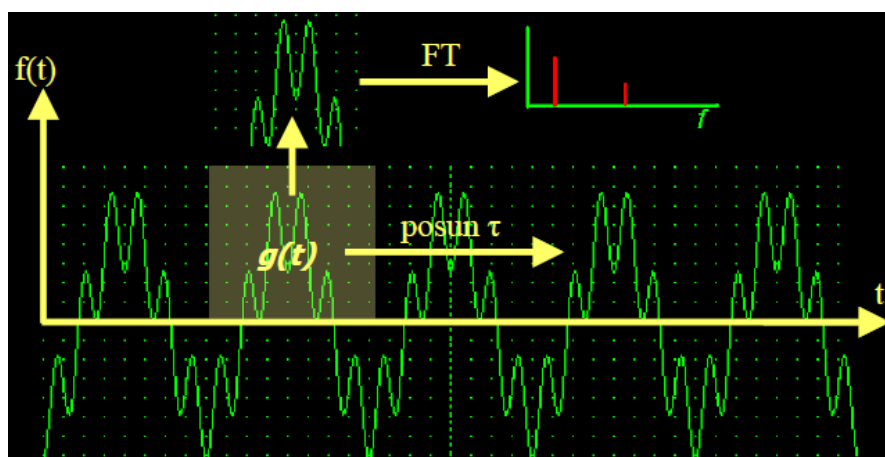
kde g je okénková funkce, $*$ komplexní konjugace, t' časové posunutí okénka, $x(t)$ je časová reprezentace signálu a $STFT_X^{(\omega)}(t', f)$ je jeho časově-frekvenční reprezentace.

Je-li zpracována diskrétní posloupnost, je nutné definici (5-53) upravit do sumačního tvaru:

$$STFT(m, k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot g[n-m]^* \cdot e^{\frac{-j2\pi kn}{N}}, \quad (5-54)$$

kde $x[n]$ je datová posloupnost analyzovaného signálu, g okénková funkce, m posunutí okna, $*$ komplexní konjugace, k frekvenční složka a N celkový počet vzorků signálu. Princip metody je zachycen na obr. 5-14.

Vynesením vypočtených hodnot STFT resp. výkonového časově-frekvenčního spektra do grafu, se získají spektrogramy. Nejčastější je dvourozměrné zobrazení pomocí hustotních spektrogramů, ve kterých určité amplitudy nebo hodnoty spektrální funkce je přiřazen odpovídající barevný odstín



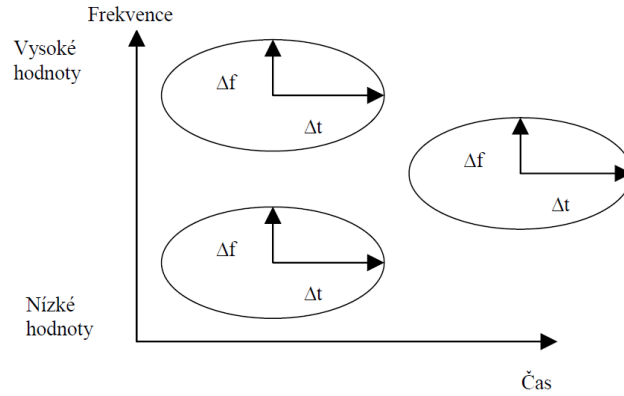
Obr. 5-14 Princip výpočtu metodou STFT; zdroj: autor

5.2.3.2 Heisenbergův princip neurčitosti

Časově-frekvenční zobrazení STFT má určité omezení. Výsledné rozlišení v čase je limitováno tzv. Heisenbergovým principem neurčitosti, který lze znázornit pomocí tzv. Heisenbergových elips, a který je definován rovnicí [69]:

$$\Delta t \cdot \Delta f = konst. \quad (5-55)$$

Rozlišení v časové i frekvenční oblasti nemůže být nekonečně malé, lze je vyjádřit výše uvedeným principem neurčitosti. Vztah (5-55) silně závisí na volbě časové okénkové funkce g . Složka signálu nemůže být prezentována jako bod v časově-frekvenčním prostoru. Je možné určit pouze její pozici uvnitř obdélníka $\Delta t \cdot \Delta f$ v dané časově-frekvenční oblasti.



Obr. 5-15 Heisenbergovy elipsy; zdroj: [69]

5.2.3.3 Transformace z Cohenovy třídy

Do transformací z Cohenovy třídy patří např. nelineární časově-frekvenční transformace Rihaczek. Tato transformace není omezena Heisenbergovým principem neurčitosti. Dokáže nám lépe lokalizovat stěžejní frekvenční oblasti vyhodnocovaného signálu a určit jejich působení v čase, čímž je pro praktické potřeby velmi dobře použitelná [77, 78, 106].

Třída Cohenových transformací je definována základním vztahem:

$$C_x(t, \omega; \psi) = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot \iiint e^{-j \cdot \theta \cdot t - j \cdot \tau \cdot \omega + j \cdot \theta \cdot u} \cdot \psi(\theta, \tau) \cdot x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot du \cdot d\tau \cdot d\theta, \quad (5-56)$$

kde x představuje signál, t je čas, τ časové posunutí, ω úhlová frekvence, θ frekvenční posunutí, $\psi(\theta, \tau)$ je jádrová funkce příslušné transformace.

Jádrová funkce transformace Rihaczek má tvar:

$$\psi(\theta, \tau) = e^{\frac{j \cdot \theta \cdot \tau}{2}}. \quad (5-57)$$

Koeficienty $C_x(t, \omega; \psi)$ mohou být interpretovány jako dvourozměrná Fourierova transformace vážená autokorelační funkcí zpracovávaného signálu. Rovnice (5-56) se pak dá přepsat do tvaru:

$$C_x(t, \omega) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \iint A_x(\theta, \tau) \cdot \psi(\theta, \tau) \cdot e^{-j \cdot \tau \cdot \omega} \cdot e^{j \cdot \theta \cdot t} d\tau \cdot d\theta, \quad (5-58)$$

kde $A_x(\theta, \tau)$ je autokorelační funkce signálu $x(t)$ daná rovnicí:

$$A_x(\theta, \tau) = \int x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{j \cdot \theta \cdot t} dt. \quad (5-59)$$

Všechny integrály jsou nevlastní s mezemi od $-\infty$ do $+\infty$. Jádrová funkce $\psi(\theta, \tau)$ je funkcí vážení a jednoznačně určuje vlastnosti dané transformace. Součin $A_x(\theta, \tau) \cdot \psi(\theta, \tau)$ je charakteristická funkce. Protože autokorelační funkce představuje bilineární operaci na zpracovávaném signálu, objevují se ve výsledném zobrazení příspěvky od křížových komponent. Tyto pak zhoršují výsledné rozlišení, což je možné omezit volbou vhodné jádrové funkce.

6. Výběr vhodného stanoviště měření

Státní správce dráhy v České republice má zavedeny postupy systému péče o kvalitu výrobků používaných na železniční dopravní cestě [79]. Součástí postupu je rovněž provozní ověřování prototypu výrobku, počáteční série či technologického procesu. O nutnosti provozního ověřování rozhoduje pověřený útvar správce dráhy. Ten rovněž stanovuje v součinnosti s výrobcem nebo dodavatelem výrobku, příp. zhotovitelem technologického procesu podmínky a požadavky na zřízení ověřovacích úseků. Ty jsou vybírány prakticky pouze na základě odborného odhadu – neexistují implicitně stanovená pravidla výběru. Volí se nejčastěji náročné provozní podmínky, aby sledovaná konstrukce prokázala své vlastnosti dostatečně. Při výběru ověřovacích úseků se zohledňují také obecné technické podmínky daného výrobku. Jelikož je zřízení zkušebních úseků v rámci novostaveb organizačně náročné a je s ním nutné počítat již při návrhu, většinou se pro tyto účely volí stávající tratě.

Obecné technické a provozní požadavky na zřizování zkušebních úseků částečně stanovuje ČSN EN 13146-8 a ČSN ISO 3095. Tyto požadavky již byly popsány v kapitole 1.2, resp. v kapitole 4.2.5.1. Mezi další velmi důležité a často opomíjené požadavky vyvolané potřebami praxe patří:

- snadná přístupnost měřicího úseku;
- dostupnost zdroje elektrického napětí;
- dostupnost dopravních informací ve vztahu k zajištění bezpečnosti práce.

Je třeba mít na paměti, že jednotlivá měření vyžadují dopravit měřicí aparaturu na vybrané stanoviště. To musí být proto snadno přístupné silničním vozidlem. Profil tratě v místě měření musí také umožňovat bezpečný a snadný pěší pohyb a manipulaci s vybavením. Dále musí poskytovat prostor pro umístění měřicí aparatury a souvisejícího vybavení, kterým je například stolek pro PC nebo ústřednu, židle, kabeláž, slunečník nebo altán, nářadovna či agregát. V neposlední řadě musí poskytovat bezpečný prostor pro pracovníky při průjezdu vlaku.

V průběhu měření je nutné zajistit napájení měřicí aparatury. V případě krátkodobých měření je toto možné prostřednictvím baterií nebo dieslového agregátu. U rozsáhlejších nebo dlouhodobých měření je velmi žádoucí, aby v daném měřicím stanovišti byl vybudovaný přístup k trvalému zdroji elektrického napětí, minimálně střídavého s efektivní hodnotou 230 V.

Značně problematická může být organizace měření vzhledem k zajištění podmínek bezpečnosti práce dle předpisu Bp1 [80]. Na tratích s rychlostmi nad $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ nemohou být měřické práce povoleny bez předávání informací o jízdách vozidel dopravním zaměstnancem. Způsob předávání informací je s dopravním zaměstnancem dohodnutý při vyhotovení zápisu v telefonním zápisníku. Měřicí úseky je nutné vybírat tak, aby byly spolehlivě pokryté signálem z předpokládaného způsobu komunikace (mobilní nebo radiokomunikační síť, síť GSM-R). Při nezajištění těchto podmínek pak musí být po dobu prací dočasně omezena provozní rychlost, což je pro všechny zúčastněné strany velmi nepopulární a nežádoucí řešení.

Pro účely mé dizertační práce bylo nutné nalézt mechanismus výběru měřicích stanovišť na stávajících tratích v analogii s výběrem místa vhodného pro zřízení zkušebního úseku. S ohledem na výše uvedené skutečnosti byl stanoven následující postup pro výběr měřicího stanoviště:

- lokalizace vhodného úseku dle projektové dokumentace nebo nákrešného přehledu železničního svršku (NPŽSv) a na základě znalosti grafikonu vlakové dopravy;
- ověření kvality geometrie koleje na základě výstupů z měřicího vozu nebo měřicí drezíny pro železniční svršek;
- charakterizace dynamických vlastností úseku koleje při průjezdu vozidla (drsnost kolejnice, stupeň dynamického útlumu trati TDR);
- určení konkrétního měřicího profilu na základě predikce kvality podepření pražců.

6.1 Lokalizace vhodného úseku měření

V první řadě je důležité definovat, jakou konstrukci chceme měřit a jakým způsobem a zvolit referenční sestavu. V mém případě se jednalo o konstrukce upevnění kolejnic uvedené v tabulce 1-3. Jejich vzájemné srovnání je předmětem kapitoly 7. Při výběru tratě a úseku vhodného pro měření se uplatnily u stávající infrastruktury nákrešné přehledy železničního svršku nebo realizační projektová dokumentace v případě nových a rekonstruovaných tratí, které na oficiální žádost poskytuje správce dráhy. Dále byly využity různé internetové stránky informující o řazení vlaků (www.zelpage.cz), o dopravním zatížení (www.szdc.cz) nebo o terénních podmínkách v bezprostředním okolí trati (www.mapy.cz).

Preferovány byly úseky s přibližně stejným stářím testovaných konstrukcí, všechny v soustavě UIC 60, s bezстыkovou kolejí a bez viditelných vad na pojížděné ploše kolejnicových pásů. Jako referenční sestavy byly zvoleny systémy upevnění W14, resp. KS, které jsou na českých tratích v oblasti pružných upevnění nejrozšířenější a správce má s nimi bohaté zkušenosti. Z hlediska směrového a výškového uspořádání koleje byly vybírány srovnatelné přímé úseky trati nebo úseky v kružnicové části směrových oblouků, tedy místa s ustálenou jízdní charakteristikou kolejových vozidel. Snahou bylo vyhnout se místům se změnou křivosti a přilehlým přechodovým oblastem. Dalším kritériem výběru byla co možná nejvyšší traťová rychlost, stejný řád koleje (srovnatelné provozní zatížení) a v neposlední řadě také srovnatelná skladba vozidel. Z těchto důvodů je velmi vhodné provádět samotná měření v navazujících traťových úsecích a ve stejnou denní dobu. Pro měření byly využity jak úředně evidované zkušební úseky, tak i další úseky zvolené na základě výše uvedených preferencí.

6.2 Kvalita geometrie koleje v daném úseku měření

V druhém kroku je nutné ověřit, zda vybrané úseky trati jsou udržovány ve srovnatelných provozních podmínkách. Pro tento účel mohou dobře posloužit výstupy z měřicího vozu, příp. z měřicí drezíny pro železniční svršek.

V rámci kontroly stavu tratí provádí správce dráhy na základě vyhlášky č. 177/1995 Sb. pravidelná měření, prohlídky a vyhodnocení pro zajištění provozuschopnosti dráhy. Rozsah stanovených prohlídek a měření je uveden v předpisu SŽDC S 2/3 [81]. V rámci kontrolních

prohlídek je, mimo jiné, zajišťováno měření geometrického a konstrukčního uspořádání koleje. Diagnostickými prostředky pro měření a hodnocení stavu geometrických parametrů koleje s kontinuálním záznamem měřených parametrů jsou měřicí vůz, měřicí drezína či malá měřicí drezína.

Měřicí vůz pro železniční svršek (MVŽSv) zajišťuje měření na koridorových tratích a na důležitých celostátních tratích. Měřicí rychlost MVŽSv je 10 až 160 km·h⁻¹ pro rozsah D1 a 70 až 160 km·h⁻¹ pro rozsah D2. Měřicí drezína (MD) je nasazována na méně zatížených celostátních tratích a na tratích regionálních. Měřicí rychlost MD je 10 až 80 km·h⁻¹. Malá měřicí drezína (MMD) je po svojí modernizaci započaté v roce 2013 ve stádiu zkušebního provozu a má být určena pro měření dopravních kolejí železničních stanic. Maximální měřicí rychlost MMD je 50 km·h⁻¹. Metodika měření a hodnocení geometrických a dalších parametrů koleje prostřednictvím měřicích vozů pro železniční svršek je obsažena ve služební rukověti SŽDC SR 103/4(S) [82].

Měřicí vůz je určen pro měření geometrických parametrů koleje, měření vertikální mikrogeometrie kolejnic, měření příčného profilu kolejnic a hodnocení odezvy vozidla. Ve fázi ověřování je rovněž nově přidáný systém videoinspekce koleje. Při měření je využíváno bezkontaktního měřicího systému TMS (Track Measuring System). Systém snímání GPK je založen na hodnocení polohy kolejnic ve svislém a příčném směru vzhledem k inerciálnímu vztažnému bodu. Snímání veličin je zajištěno akcelerometry, gyroscopy, indukčními snímači posunutí, laserovými zdroji světla a optickým systémem kamer. Z naměřených hodnot jednotlivých snímacích jednotek vypočítá systém geometrické parametry koleje. Měřicí vůz pro železniční svršek zajišťuje měření těchto geometrických parametrů koleje:

- směr koleje: v ose koleje, levého a pravého kolejnicového pásu;
- podélná výška koleje: v ose koleje, levého a pravého kolejnicového pásu;
- převýšení koleje: celkové, dynamické, kvazistatické;
- rozchod koleje: celkový, dynamický;
- křivost koleje.

V rámci sledování GPK jsou na sledovaných měřicích úsecích hodnoceny následující parametry:

- směr koleje (SK);
- zborcení koleje (ZK);
- rozchod koleje (RK);
- převýšení koleje (PK);
- podélná výška koleje (VL, VP, VK).

Metodika hodnocení geometrických parametrů koleje vychází ze statistické analýzy hodnot směrodatných odchylek jednotlivých základních veličin pro 200 m úseky trati. Pro výstup úsekového hodnocení jsou místo směrodatných odchylek použity bezrozměrné parametry, tzv. známky kvality. Známky kvality převádějí hodnoty směrodatných odchylek na číselné hodnoty se stejným významem pro libovolnou kategorii trati, libovolné rychlostní

pásmo a libovolný parametr koleje. Znamky kvality jsou bezrozměrné parametry a jsou rozděleny do tří skupin:

- známky kvality definovaných parametrů ZKV;
- celková známka kvality CZK;
- známka podbíjení ZP.

Znamky kvality jsou navrženy tak, aby pro dané rychlostní pásmo měly statistické rozdělení pravděpodobností s průměrem 3 a stanovený podíl všech hodnot kterékoli ze známek byl menší nebo roven 4. Mezní hladinou pro hodnocení vyhovujících tratí (z hlediska standardu údržby) za provozu pro jednotlivé známky je hodnota 4 včetně.

Znamky kvality jednotlivých měřených parametrů (směr, rozchod, převýšení a výška) jsou dány logaritmickým transformačním vztahem:

$$ZKV = 6 \cdot (1 - \exp(-SDO^m / b)), \quad (6-1)$$

kde hodnota směrodatné odchylky SDO příslušné veličiny je dána vztahem:

$$SDO = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (6-2)$$

kde n je počet vzorků měření a x_i je odchylka geometrické hodnocené veličiny. Konstanty b a m jsou stanoveny na základě statistik směrodatných odchylek příslušné veličiny a příslušného rychlostního pásma.

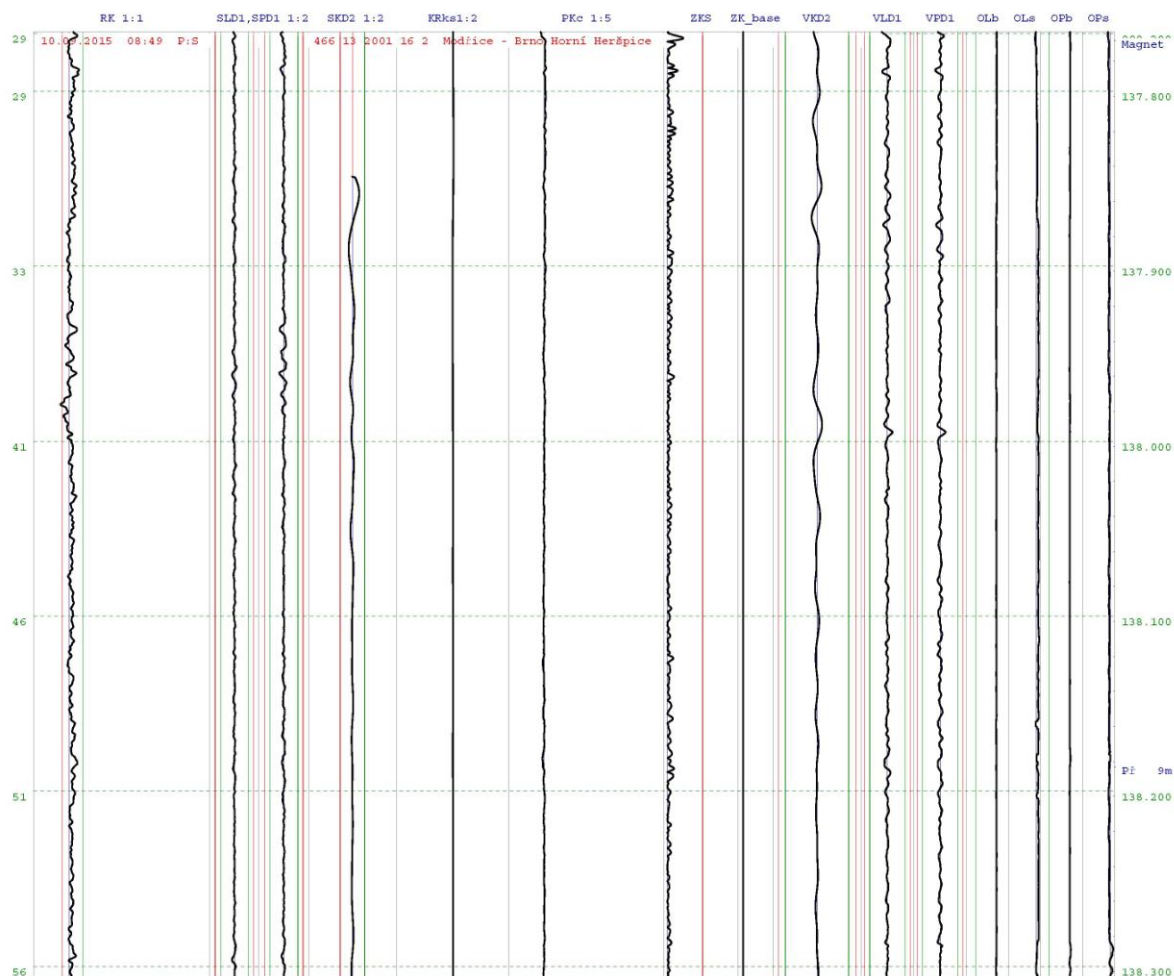
Celková známka kvality CZK a známka podbíjení ZP jsou stanoveny z jednotlivých známek kvality ZKV na základě tzv. hybridního kritéria ze vzorce:

$$CZK, ZP = [k \cdot \max\{(w_{SK} \cdot ZKV_{SK} + w_{RK} \cdot ZKV_{RK}), (w_{PK} \cdot ZKV_{PK} + w_{VK} \cdot ZKV_{VK})\}]^q, \quad (6-3)$$

kde váhy w jednotlivých veličin jsou stanovené na základě korelační analýzy a jsou pro CZK a ZP rozdílné. Parametry k a q jsou závislé na rychlosti a pro každé rychlostní pásmo nabývají jiných hodnot. Zámka podbíjení ZP je celková známka kvality CZK, kde při výpočtu není započítán vliv rozchodu.

Protože hodnoty konstant m a b se nepravidelně upravují na základě statistického hodnocení kvality GPK v železniční síti ČR a není jednoduché tyto hodnoty získat, byla kvalita GPK pro účely dizertace úsekově hodnocena na základě směrodatných odchylek sledovaných parametrů. Současně s tím bylo přihlíženo k případným lokálním závadám, jejichž přítomnost by měla negativní dopad na získané výsledky. Optimální je hodnotit výstupy z posledních tří uskutečněných měřicích kampaní GPK před datem plánovaného měření dynamických a akustických parametrů kolejnicových upevnění. Zohlední se tím trend vývoje kvality GPK v čase. Výsledky měření GPK byly srovnávány s provozními a mezními provozními odchylkami GPK uvedenými v ČSN 73 6360-2.

Systém MVŽSv CMS (Corrugation Measurement System) navíc umožňuje hodnocení vertikální mikrogeometrie kolejnic na základě SDO hodnocených v úsecích po 20 m a dynamické odezvy svarů a styků. Tím je možné odhalit vady na pojízdné části kolejnice (vlnovitost, propadlé svary), které by rovněž negativně ovlivnily výsledky mého měření.



Obr. 6-1 Grafická výstupní sestava MVŽSv; trať Modřice – Brno-Horní Heršpice;
zdroj: SŽDC TÚDC

Km:138 Příčný směr [mm]														
SL	SKD2	SP	ZR	RK	PK	ZKS	Svislý směr [mm]		VL	VKD2	VP	Y/Q	Pd	RP3 MH2
SL SKD2 SP ZR RK PK ZKS (zks_max) VL VKD2 VP Y/Q Pd Objekt														
186 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |														

Obr. 6-2 Výpis lokálních závad a úsekové hodnocení GPK MVŽSv; trať Modřice –
Brno-Horní Heršpice; zdroj: SŽDC TÚDC

6.3 Charakterizace dynamických vlastností úseku koleje

Aby vybrané úseky měření bylo možné označit jako referenční, je potřeba definovat a následně porovnat jejich dynamické vlastnosti. Tyto vlastnosti pak musejí být přibližně stejné. Jako základní dynamické parametry, jimiž je možné popsat vybraný traťový úsek, definuje norma ČSN EN ISO 3095:

- akustickou drsnost povrchu kolejnice;
- svislou a příčnou dynamickou odezvu trati,

kdy příčnou dynamickou odezvu trati není nutné určovat v úsecích s pevnou jízdní dráhou. Norma dále stanovuje standardní křivku horní meze pro hladinu akustické drsnosti povrchu kolejnice, resp. výchozí dolní limitní křivky stupně dynamického útlumu. Dodržením těchto limitních hodnot se předpokládá minimalizace vlivu trati (tj. zejména valivého hluku) na výsledky celkových hlukových emisí. Pro účely mé dizertační práce však není minimalizace vlivu trati na hlukové emise důležitá. Posouzení dle limitních normových hodnot sledovaných parametrů je proto zbytečné.

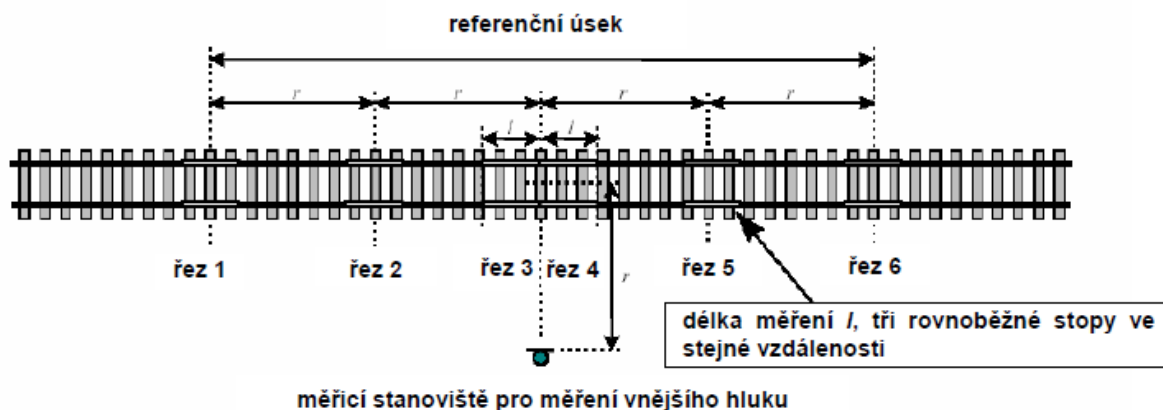
6.3.1 Drsnost kolejnice

Akustická drsnost kolejnice $r(x)$ [μm] je dle normy ČSN EN 15610 [85] definována jako změna výšky pojížděné plochy hlavy kolejnice v souvislosti s vybuzením hluku valením vyjádřená jako funkce vzdálenosti x podél kolejnice. Amplituda akustické drsnosti vyjádřená Fourierovou transformací z $r(x)$ jako funkce vlnové délky λ se nazývá spektrum akustické drsnosti $\hat{r}(\lambda)$ [μm]. Spektrum akustické drsnosti $\hat{r}(\lambda)$ je obvykle prezentováno jako hladina akustické drsnosti L_r [dB]:

$$L_r = 10 \cdot \log \left(\frac{r_{RMS}^2}{r_0^2} \right), \quad (6-4)$$

kde r_{RMS} [μm] je efektivní hodnota drsnosti a r_0 je referenční drsnost udaná hodnotou $r_0 = 1 \mu\text{m}$.

Norma ČSN EN 15610 dále stanovuje postupy pro výběr měřicí pozice, sběr a úpravu dat, vyhodnocení upravených dat a pro prezentaci a porovnání výsledků měření s limity z ČSN EN ISO 3095. Předmětem ISO normy je rovněž postup pro porovnatelnost měřících úseků z hlediska výsledků přímého měření akustické drsnosti kolejnic. Přímé měření drsnosti se provádí v jedné nebo ve třech stopách v závislosti na šířce referenčního povrchu w_{ref} [mm], kdy rozhodující hodnotou by měla být šířka $w_{ref} = 20 \text{ mm}$, nebo v závislosti na typu snímače (kontaktní, bezkontaktní). Metodika Výzkumného ústavu železničního, a.s. [66] doporučuje měření v šesti řezech minimální délky $l = 1,0 \text{ m}$. Osová vzdálenost řezů má pak být dána hodnotou vodorovné délky nejvzdálenějšího mikrofону od osy koleje r [m], tzn. v mém případě 7,5 m. Řezy ve středové části referenčního úseku se přitom dotýkají. Celková délka jednotlivých referenčních úseků je tedy 30 m s předpokládanou polohou měřicího stanoviště umístěného ve středu délky referenčního úseku, viz obr. 6-3.



Obr. 6-3 Uspořádání přímého měření drsnosti; zdroj: [66]

Komerčně dodávané přístroje pro měření drsnosti povrchu kolejnice umožňují často také měření vlnkovitosti. Sestávají se z měřicího vozíku a externího počítače. Vozík je vybaven snímači s potřebnou mechanikou a elektronickou jednotkou, která přenáší naměřená data do počítače (bezdrátově nebo pomocí kabelu). Mohou být doplněny elektromotorem umožňujícím samostatný pohyb vozíku nebo obsluhovány ručně. Software pro úpravu a vyhodnocení dat postupy dle ČSN EN 15610 bývá součástí zařízení. Pro zpracování signálu se nejčastěji rozlišují následující bloky:

- filtrace odlehlých špiček (spike filter);
- filtrace měřených dat do rozsahu potřebného pro hlukové vyhodnocení;
- filtrace průjezdem kola o poloměru 375 mm (pits filter);
- výpočet průměrného spektra s polovičním překrytím;
- výpočet výsledného logaritmického třetinooktávového spektra a jeho porovnání s normovým limitem.



Obr. 6-4 Měřicí přístroj MDK-01; zdroj: www.kzv.cz

Jelikož ÚŽKS podobným zařízením v době mého měření nedisponoval a komerčně objednané měření drsnosti je velmi nákladné, praktickou charakterizaci dynamických vlastností měřicích úseků jsem založil pouze na vizuální kontrole stavu pojezdné plochy kolejnice a na stanovení stupně dynamického útlumu trati, viz kapitola 6.3.2.

6.3.2 Stupeň dynamického útlumu trati TDR

Track Decay Rate (TDR) neboli stupeň dynamického útlumu trati indikuje míru tlumení vibrací koleje s rostoucí vzdáleností podél tratě. Dynamický útlum vibrací koleje je jeden z možných indikátorů hlukového znečištění trati. Existují dvě základní metody určené ke stanovení TDR:

- metoda Evropské asociace pro interoperabilitu na železnici AEIF;
- metoda Pass-by-Analysis TNO/PBA.

Metoda AEIF měří dynamický útlum trati bez zatížení kolejovou dopravou. Naproti tomu metoda TNO/PBA počítá stupeň útlumu, jak už sám název Pass-by-Analysis napovídá, ze signálu vibrací projíždějících kolejových vozidel, tedy na trati s provozním zatížením.

Útlum vibrací prakticky představuje postupné zmenšování výchylek kmitů konstrukce. Pro účely mé dizertační práce byla použita metoda AEIF, pro její dostupnou standardizaci díky normě ČSN EN 15461+A1 [86]. Tato metoda měří útlumy kolejnice ve chvíli, kdy neprojíždí žádný vlak.

Dynamické útlumy v příčném a ve svislém směru jsou vyvozeny pomocí úderu rázového kladívka na kolejnici. Zjišťují se odezvy v rostoucích vzdálenostech od bodu buzení. Celý postup je relativně rychlý v závislosti na intenzitě dopravy a nevyžaduje vyloučenou kolej. Minimální limity dynamických útlumů jsou definovány v normě ČSN EN ISO 3095. Tato minima pro příčný i svislý směr jsou zobrazena v podobě křivek spojujících nejmenší požadované hodnoty útlumu v daných frekvencích. Aby trať vyhověla požadavkům pro měření emisí hluku železničních vozidel v rámci typových schvalovacích zkoušek, musí se křivka TDR měřené trati nacházet v celém třetinooktávovém pásu nad limitními hodnotami. Pro účely mého měření však dostačuje, když křivky TDR jsou v jednotlivých vybraných úsecích měření navzájem srovnatelné.

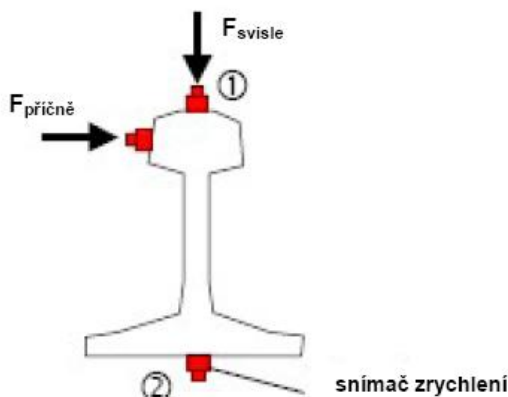
6.3.2.1 Uspořádání měření TDR

Úsek měření dynamického útlumu musí odpovídat místu, kde se předpokládá zjišťování akusticko-dynamických parametrů trati. Tomu odpovídají i podobné požadavky na trať. Úsek pro měření TDR musí být v bezstykové koleji se svařenými dlouhými kolejnicovými pásy. V měřeném úseku koleje se nesmí nacházet dilatační zařízení. V celém zkušebním úseku musí být kvalita koleje konstantní s ohledem na všechny parametry, které mohou ovlivnit míry dozívání. Tyto parametry zahrnují průřezové moduly kolejnice, tuhost podložky pod kolejnicí, převýšení kolejnic a rozdělení pražců. Od počátečního bodu 0 (v předpokládaném místě stanoviště měření) se nesmějí v oboustranné vzdálenosti minimálně 40 m vyskytovat žádné závady ve formě uvolněných pražců, upevňovadel apod.

6.3.2.2 Postup měření TDR

Bod 0 představuje místo na nepřevýšeném kolejnicovém pásu. Nachází se v ose mezipražcového prostoru. Na toto místo se přichytí dva snímače zrychlení vibrací. Ke kolejnici je možné je fixovat prostřednictvím včelího vosku. Aby nedošlo při průjezdu vlaků k jejich zničení vlivem vysoké dynamické odezvy, je doporučeno volit akcelerometry

s menší citlivostí. Snímač pro měření odezvy ve svislém směru je dle metodiky doporučeno nalepit na temeno kolejnice (bod 1 na obr. 6-5). Tím by však nemohla být zachována kolej v době měření v plném provozu. Z toho důvodu bylo voleno metodikou akceptované umístění snímače na patě kolejnice (bod 2). Akcelerometr pro příčnou odezvu je umístěn na nepojížděné hraně hlavy kolejnice.



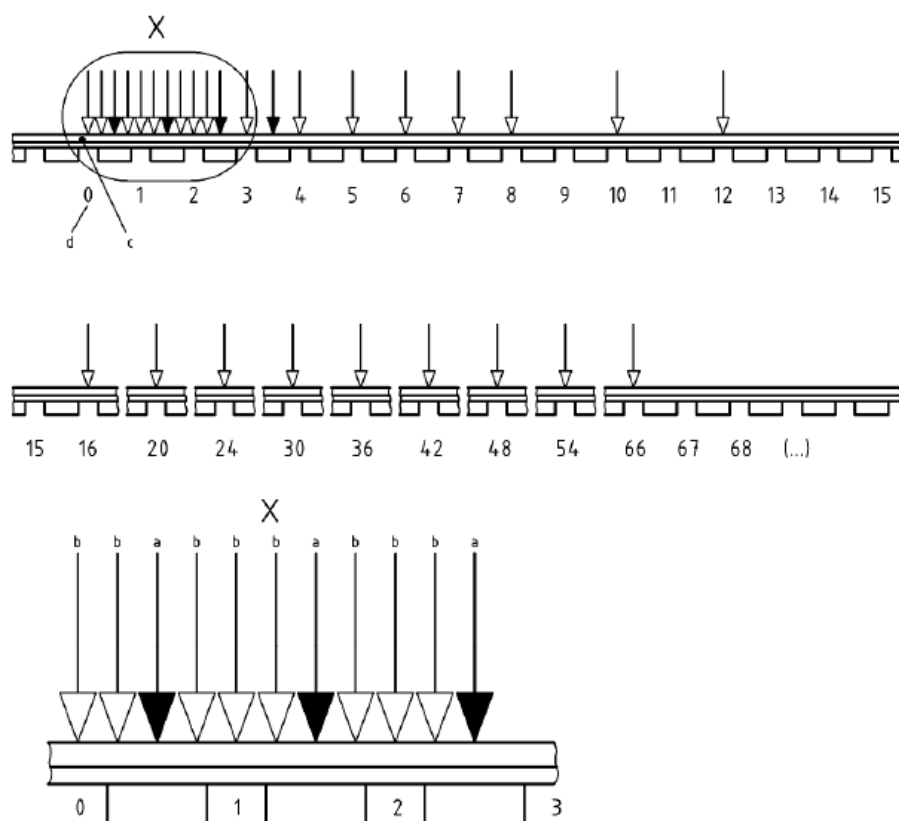
Obr. 6-5 Umístění akcelerometrů pro určení TDR; zdroj: [66]

Buzení kolejnice pomocí rázového kladívka má řadu výhod. Je rychlé, nevyžaduje žádné náročné přípravné práce a je snadno použitelné v provozních podmínkách. Tuhost dotýkajících se povrchů a hmotnost hlavy kladívka ovlivňuje rozsah frekvencí, který je účinně vybuzen. Výška a doba trvání pulsu je závislá na hmotnosti kladívka, materiálu hrotu kladívka, rychlosti úderu a dynamických charakteristikách povrchu.

Buzení rázovým kladívkem se provádí nejprve příčně, následně pak svisle. Předepsaný kmitočtový rozsah je minimálně 50 Hz až 6000 Hz. Začíná se budit v bodě 0 a postupuje se dále od místa snímače zrychlení. Zjišťuje se tvar přenosové funkce akcelance ve zprůměrovaném třetinooktávovém spektru v rozsahu pásem o středních frekvencích 100 Hz až 5000 Hz. Je požadováno, aby byla v každém bodě rázu kladívka provedena nejméně čtyři měření. Při buzení rázovým kladívkem by měly všechny údery mířit kolmo k povrchu kolejnice. Údery každé sady by měly navíc mířit přibližně do stejného místa. Komplikací bývají vícenásobné údery čili odskoky kladívka. Těm je třeba se vyvarovat, neboť způsobují potíže při zpracování signálů.

Jak již bylo uvedeno, měření odezev začíná impulzem v referenčním bodě 0. Kromě tohoto bodu se v měnicích se vzdálenostech na kolejnici vyskytují body blízkého pole, tj. body v blízkosti akcelerometru, a body vzdáleného pole. Místa nárazů kladívka jsou definována pomocí čísla mezery mezi pražci, přičemž mezera 0 reprezentuje právě umístění bodu 0. V blízkém poli se vyskytují body od mezery 0 po mezeru 2, včetně pražce, který následuje za mezerou 2. Vzdálenosti míst odpovídají čtvrtině rozdělení pražců, z čehož vyplývá, že jsou zde tři body v mezipražcovém prostoru a jeden bod přímo nad pražcem. Detail bodů blízkého pole lze vidět v dolní části obr. 6-6 (detail X). Celkově se jedná o 11 bodů – referenční bod 0 plus deset dalších bodů. Dále následují body vzdáleného pole. Mezery mezi nimi již nejsou konstantní, ale pro skupiny několika bodů se postupně zvětšují. Tři další body nárazu kladívka jsou ve vzájemných vzdálenostech poloviny rozdělení pražců.

Dvanáctý bod se tedy nachází v mezeře 3, třináctý bod nad pražcem, který za mezerou 3 následuje a čtrnáctý je v mezeře 4. Následuje sekvence čtyř bodů, které jsou už jen mezi pražci, tedy v mezerách 5, 6, 7 a 8. Interval dalších dvou míst pro údery kladívka je dvakrát větší, body se nachází v mezerách 10 a 12. Poté opět následuje dvakrát zvětšená vzdálenost oproti předešlému intervalu a body v mezerách 16, 20 a 24. Dalších pět bodů je od sebe vzdálených na šestnásobek rozdělení pražců, měření tedy probíhá v mezerách 30, 36, 42, 48 a 54. Poslední předpokládaný bod je v mezeře 66. Všechna místa vyvolání impulsu zrychlení jsou znázorněna na obr. 6-6.



Legenda

- a ↓ Náraz kladívka do kolejnice nad pražcem
- b ↓ Náraz kladívka do kolejnice mezi pražci
- c Umístění snímače zrychlení
- d Index mezery mezi pražci

Obr. 6-6 Místa úderu rázovým kladívkem při metodě AEIF; zdroj: [66]

Frekvenční odezva v bodě 0 slouží jako referenční. S údery se postupuje až do té vzdálenosti, dokud v každém třetinooktávovém frekvenčním pásmu není rozdíl mezi hladinou frekvenční odezvy daného pásma pro referenční měřicí bod 0 a hladinou frekvenční odezvy v daném bodě minimálně 10 dB. Předpokládá se obvyklá vzdálenost 40 m od bodu 0, což odpovídá právě mezeře mezi pražci 66.

Je nutné vytvořit alespoň dva úplné soubory měření symetrického vůči bodu 0. Následující soubory se musí změřit buď na druhé kolejnici, nebo na stejné kolejnici za předpokladu, že se místa měření impulsních odezev nalézají od sebe ve vzdálenosti alespoň 10 m. Při měřeních v rámci dizertační práce byl uplatněn první přístup. Při měření bylo možné

ihned in situ sledovat hodnoty hladin frekvenční odezvy. To přinášelo značnou výhodu v kontrole postupného snižování hladin frekvenční odezvy a zkouška se tak dala ve správném okamžiku ukončit. Ve všech případech měření TDR došlo k 10 dB poklesu napříč celým třetinooktávovým pásmem ve vzdálenosti menší, než je doporučených 40 m od snímačů zrychlení. Přesto však byla každá zkouška dokonána až k doporučené mezeře mezi pražci 66.



Obr. 6-7 Provádění zkoušky TDR; zdroj: autor

6.3.2.3 Měřicí aparatura pro stanovení TDR

Pro měření TDR je doporučeno používat jednoosé akcelerometry ICP s citlivostí $1,0 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ a s maximálním zrychlením $7000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Pro zkoušku se také osvědčilo rázové budicí kladívko s hmotností hlavy 280 g, s citlivostí $4 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$, maximální budicí silou 5000 N a s frekvenčním rozsahem 0 Hz až 7000 Hz.

6.3.2.4 Vyhodnocení TDR

Kolej buzená rázem vyzařuje akustický výkon. Celkový akustický výkon je součinem hladiny záření koleje (tzv. vyzařovací účinnost koleje) a sumy druhé mocniny amplitud rychlosti přes vyzařovací plochu. Vztah mezi stupněm útlumu a akusticko-vyzařovacím výkonem konstrukce tratě představuje rovnice (6-5). Pro každé třetinooktávové frekvenční spektrum má být tento vztah vyjádřen jako hodnota v $[\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}]$:

$$\int_0^{\infty} |A(x)|^2 dx = |A(0)|^2 \cdot \int_0^{\infty} e^{-2\beta x} dx = |A(0)|^2 \cdot \frac{1}{2\beta}, \quad (6-5)$$

kde $A(x)$ [dB] je odezva v měřicí vzdálenosti x [m], $A(0)$ [dB] je odezva v referenčním bodě 0 a β [-] je konstanta poklesu amplitudy impulsní odezvy.

Stupeň dynamického útlumu trati může být v zásadě vyhodnocen jako sklon grafu odezvy amplitudy v dB na vzdálenost x . Pro praxi je však vhodnější hodnotit stupeň útlumu na základě přímého odhadu sumy odezvy podle vztahu:

$$\int_0^{\infty} \frac{|A(x)|^2}{|A(0)|^2} dx = \frac{1}{2\beta} \approx \sum_{n=0}^{n_{\max}} \frac{|A(x_n)|^2}{|A(0)|^2} \cdot \Delta x_n, \quad (6-6)$$

kde x_{\max} [m] je maximální měřicí vzdálenost od budicího bodu a Δx_n [m] je interval mezi střední vzdáleností měřicích bodů a měřicími body po obou stranách.

Konstantu dozívání β amplitudy impulsní odezvy A je možné převést na stupeň dynamického útlumu Δ [dB·m⁻¹]:

$$\Delta = 20 \cdot \log(e^\beta) = 8,686 \cdot \beta; \quad (6-7)$$

Hodnoty zrychlení vibrací jsou vyjádřeny ve formě třetinooktávových pásem. Stupeň útlumu pro odezvu zprůměrovanou v každém třetinooktávovém spektru pak vyplývá ze vztahů (6-6) a (6-7) a je vyjádřen vzorcem (6-8). Odezva A může být vyjádřena v podobě zrychlení nebo rychlosti. Tyto veličiny se liší pouze výrazem $2\pi f$, kde f [Hz] je frekvence. Je proto nepodstatné, v jakých jednotkách bude odezva A do vzorce vstupovat.

$$\Delta = \frac{4,343}{\sum_{n=0}^{n_{\max}} \frac{|A(x_n)|^2}{|A(0)|^2} \cdot \Delta x_n}. \quad (6-8)$$

Přesné změření $A(0)$ je důležité, jelikož se ukazuje v sumě jako konstantní faktor. Jedná se o nejsnáze měřitelnou frekvenční odezvu. Zkušenost ukázala, že zanedbání vlnového útlumu v blízkém poli nevznáší do výsledků této analýzy žádnou významnou chybu.

Pro vysoké stupně útlumu je tato metodika spolehlivá. Může však vykazovat chyby, pokud vzdálenost od budicího bodu x_{\max} zkrátí odezvu v kterémkoliv třetinooktávovém pásmu dříve, než dojde k dostatečnému útlumu. Dostatečný útlum je potřebný k tomu, aby suma na x_{\max} představovala vhodnou aproximaci k neurčitému integrálu. Minimální stupeň útlumu, jež může být vyhodnocen pro danou vzdálenost x_{\max} je:

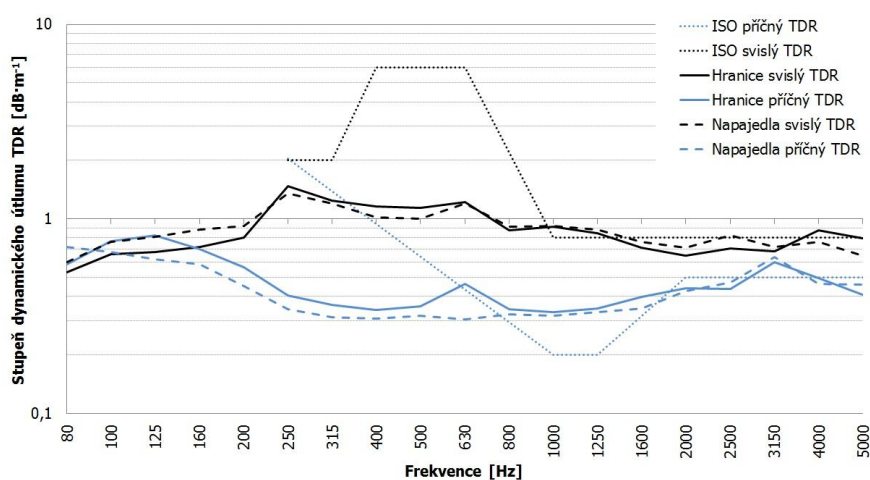
$$\Delta_{\min} = \frac{4,343}{x_{\max}}, \quad (6-9)$$

kde Δ_{\min} [dB·m⁻¹] je minimální stupeň útlumu. Vyhodnocený stupeň útlumu by se měl porovnat s touto hodnotou. Pokud se k ní blíží, považuje se tento vyhodnocený stupeň útlumu za nejistý. Vzdálenost x_{\max} okolo 40 m vyhovuje minimálním požadavkům a tedy bývá dostatečná pro vyhodnocení útlumu trati.

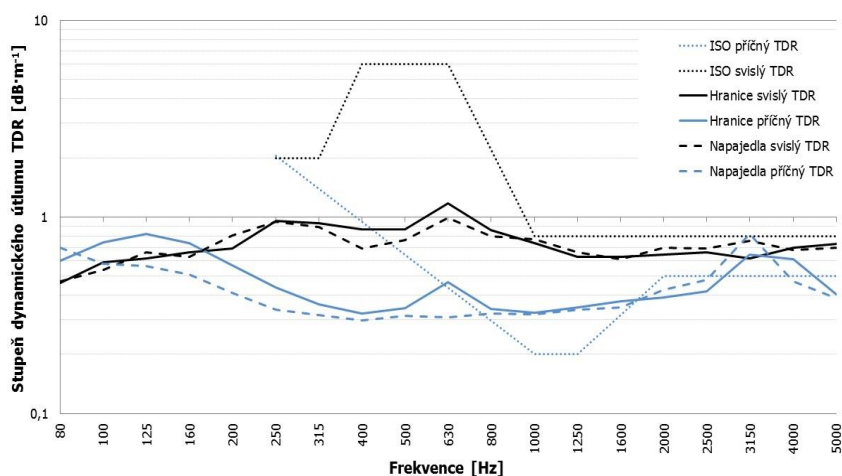
Měření bylo realizováno měřicím modulem PULSE 3560 D. V připojeném notebooku byla předem vytvořena měřicí šablona. Ta slouží k snadnému a automatizovanému měření v terénu. Vyhodnocení dynamického útlumu bylo provedeno pomocí sestavené aplikace programu Microsoft Excel.

Nejdůležitější část analýzy představuje vynesení grafu dynamického útlumu pro jednotlivé střední frekvence. Na obr. 6-8 a obr. 6-9 je vynesena křivka dynamického útlumu v závislosti na třetinooktávovém frekvenčním pásmu pro měřicí úseky v lokalitách u Hranic

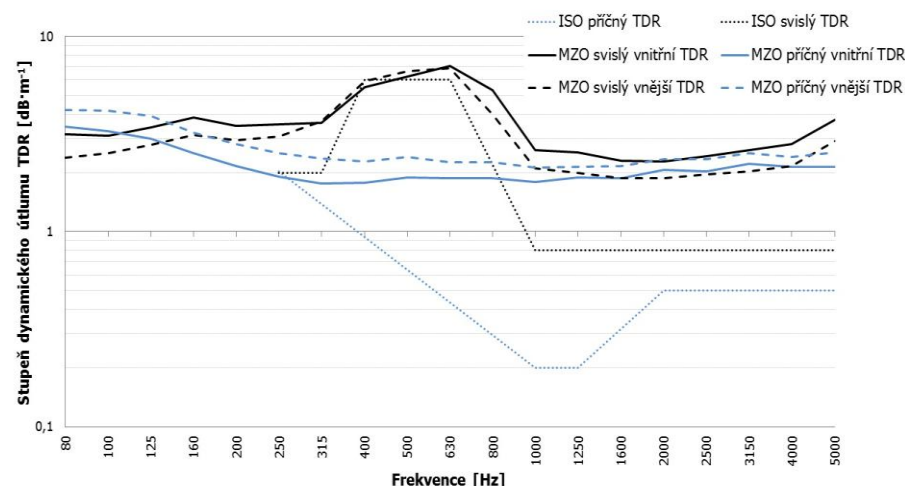
na Moravě a u Napajedel. Přestože křivky dynamického útlumu nevyhovují limitním hodnotám požadovaným normou ČSN EN ISO 3095 a nelze je tudíž, vzhledem k velikému hlukovému znečištění trati, doporučit pro typové schvalovací zkoušky hluku kolejových vozidel, vlastní průběhy TDR jak ve svislém, tak i v příčném směru lze v obou srovnávaných úsecích trati považovat za srovnatelné. Pro účely měření dynamických a akustických parametrů metodikou dle této dizertační práce jsou tudíž dané měřicí úseky vhodné. Obr. 6-10 pro ilustraci znázorňuje průběhy křivek dynamického útlumu trati, kterou je možné pro hlukové zkoušky vozidel označit jako referenční, neboť splňuje požadavky normy ČSN EN ISO 3095. Jedná se o úsek koleje s upevněním W14, který je součástí malého zkušebního železničního okruhu zkušebního centra Výzkumného ústavu železničního, a.s. v Cerhenicích.



Obr. 6-8 TDR měřicích úseků u Hranic na Moravě (upevnění W14) a u Napajedel (upevnění FCI) – vnitřní kolejnicový pás; zdroj: autor



Obr. 6-9 TDR měřicích úseků u Hranic na Moravě (upevnění W14) a u Napajedel (upevnění FCI) – vnější kolejnicový pás; zdroj: autor



Obr. 6-10 TDR měřicího úseku na malém zkušebním okruhu VUZ Velim (upevnění W14) – vnitřní a vnější kolejnicový pás; zdroj: autor

6.4 Určení konkrétního měřicího profilu

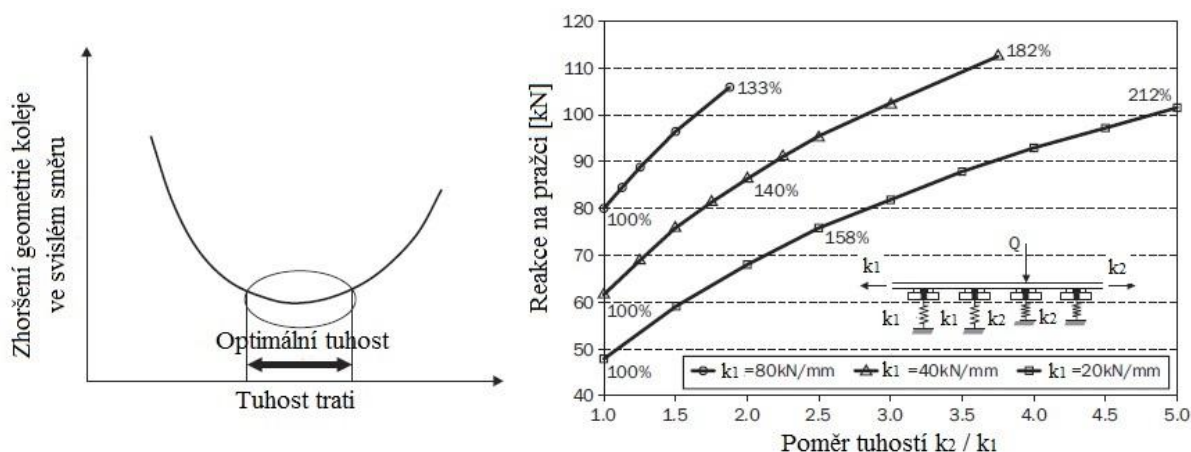
Určit ve vybraném měřicím úseku konkrétní pražec či jinou analogickou konstrukci není jednoduché. Tuzemské i zahraniční experimentální práce poukazují na skutečnost, že zejména příčné betonové pražce mají individuální podmínky podepření v kolejovém loži, které se liší prakticky kus od kusu [61, 87]. Pro určování homogenity pražcového podloží je možné využít řadu nepřímých nedestruktivních geofyzikálních metod [19, 88], např.:

- radarovou;
- elektrickou odporovou;
- seizmickou;
- impulzně-seizmickou;
- deflektoskopickou;
- metodu dálkového průzkumu Země apod.

Za jednu z nejdůležitějších vlastností při posouzení stavu železniční tratě je považována její svislá tuhost. Tuhost je důležitým parametrem při návrhu železničního tělesa a poskytuje základní informaci pro posouzení rozsahu údržby stávajících tratí. Celý systém trati vykazuje silně nelineární chování. Nedostačující tuhost trati vede k jejím deformacím, což má za následek nárůst napětí v kolejnicových pásech a s tím související jevy (ztráta drážebnosti upevnění apod.). Naopak příliš vysoká tuhost způsobuje nadměrné dynamické namáhání konstrukce trati a zvyšuje tak její opotřebení. Literatura uvádí optimální hodnoty tuhosti trati [89]:

- 80 až 130 kN·mm⁻¹ na konvenčních tratích se smíšeným provozem;
- 70 až 80 kN·mm⁻¹ na vysokorychlostních tratích a na nákladních koridorech.

Velmi důležitým parametrem je rovněž homogenita konstrukce trati. Numerické analýzy jasně prokázaly, že výrazně nehomogenní trať může zvýšit napětí na ložné ploše pražce o 30 až 50 % oproti dokonale homogenní konstrukci.



Obr. 6-11 Ilustrativní zobrazení optimální svislé tuhosti trati (vlevo); Vliv nehomogenity trati na zvýšené namáhání pražcového podloží (vpravo); zdroj: [89]

Měření tuhosti trati je možné rozdělit do dvou základních skupin:

- stacionární měření;
- kontinuální měření.

Měření na místě mohou být provedena jako statická, rázová nebo dynamická zkouška. Tyto zkoušky mohou být jak destruktivní, tak i nedestruktivní povahy. Průběžné nedestruktivní měření tuhosti je mnohem náročnější. Příslušná trať se zatěžuje za pohybu vozidla a současně se měří odpovídající průhyb kolejnice. Existuje několik systémů kontinuálního měření tuhosti trati. Literatura [90] uvádí např. švédský měřicí vůz RSMV (The Rolling Stiffness Measurement Vehicle). Jedná se o přestavěný běžný dvounápravový nákladní vůz. Nad jednou z náprav jsou umístěna dvě závaží, která svojí regulovanou oscilací vnášejí do trati dodatečné dynamické zatížení. Vibrace závaží mohou být regulovány v rozsahu 3 až 50 Hz. Účinky vozu na trať jsou snímány prostřednictvím akcelerometru umístěného na ložiskovém domku měřicí nápravy. Na nápravě se nachází rovněž převodník síly. Nápravové zatížení měřicího vozu je 180 kN s dynamickým přírůstkem max. 60 kN. Zařízení dokáže fungovat do maximální rychlosti 50 km·h⁻¹. Dalším uvedeným je systém Portancemetr určený pro železnici. Jedná se o přípojné měřicí dvojkolí s odpruženou a neodpruženou hmotou, které se připojí spolu s řídicím systémem k hnacímu vozidlu. Trať je buzena přes dva elektrické vibrátory s nastavitelnou excentricitou. Celková síla působící v daném okamžiku t [s] na trať $FTA(t)$ [kN] je získána sčítáním vektorů:

$$FTA(t) = M_1 \cdot g + M_0 \cdot a_b + (M_1 - M_0) \cdot a_c + m \cdot e \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi, \quad (6-10)$$

kde M_1 [kg] je celková hmotnost zařízení, M_0 [kg] je vibrační hmotou, g [m·s⁻²] je tíhové zrychlení, $m \cdot e$ [kNm] je excentrický moment neodpružené hmoty, a_b [m·s⁻²] je svislé zrychlení vibrující nápravy, a_c [m·s⁻²] je svislé zrychlení odpružené hmoty, ω [rad·s⁻¹] je úhlová rychlost a φ [rad] je rotační úhel.

Svislý posun koleje $z(t)$ [m] je pak vypočítán dvojitou integrací zrychlení měřicího dvojkolí:

$$z(t) = \iint a_b(t) dt dt. \quad (6-11)$$

Tuhost trati k [$\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$] se určuje jako průměrná hodnota v určitém časovém intervalu, zpravidla třiceti cyklů:

$$k = \frac{FTA(t)}{z(t)} . \quad (6-12)$$

Statické zatížení Portancemtru se pohybuje v rozmezí 70 až 120 kN s maximálním dynamickým přírůstkem 70 kN. Portancemetr dokáže pracovat při frekvencích až 35 Hz při pracovní rychlosti max. $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.



Obr. 6-12 Budicí zařízení vozu RSMV (vlevo); Systém Portancemetr zapřažený za hnací vozidlo (vpravo); zdroj: [90]

Z dalších existujících řešení lze jmenovat např. metodu FWD (Falling Weight Deflectometer) převzatou z pozemních komunikací, čínský systém CARS (The China Academy of Railway Sciences), který byl zřejmě prvním svého druhu na světě nebo americké metodiky TTCI TLV (Track Loading Vehicle) a UNL (The University of Nebraska). Speciální vůz pro určování tuhosti trati byl vyvinutý také ve Švýcarsku. Tuhost lze vyjádřit rovněž analyticky ze záznamu svislého posunu kolejnice nebo pražce [61, 90].

6.4.1 Měření kvality podepření pražce

6.4.1.1 Přímé měření zatlačení pražce

Významný vliv na správné stanovení tuhosti má kontakt mezi pražcem a kolejovým ložem. Z toho důvodu je velmi důležitý odhad kvality podepření pražců vybraného úseku měření. Pro konkrétní měřicí profil je pak zpravidla vybrán pražec vykazující kvalitativně nejvhodnější vlastnosti. Pro tento účel byl již dříve na ÚŽKS vyvinutý speciální měřicí rám, viz obr. 6-13. Rám se volně položí na vybrané místo v kolejovém roštu, rovnoběžně s osou koleje v přímé, příp. tangenciálně ke směrovému oblouku. K rámu jsou prostřednictvím speciálních objímek uchyceny indukčnostní snímače. Parametry rámu umožňují současné

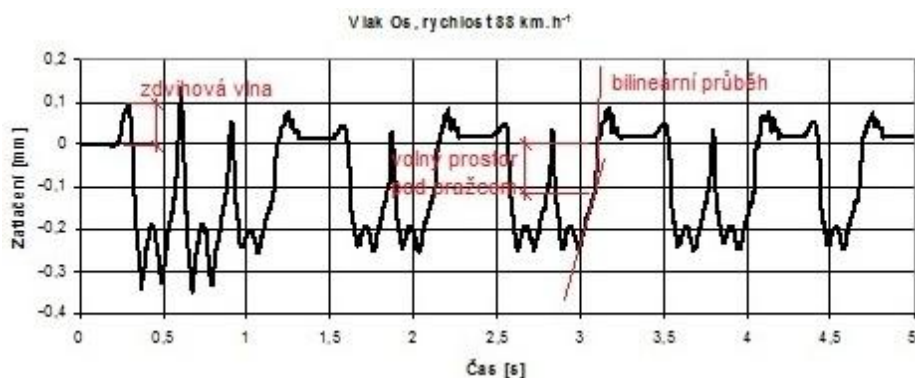
měření svislých posunů vyvolaných účinky kolejových vozidel až na šesti pražcích za sebou. Rám je díky svojí hmotnosti a způsob podepření vhodný pro měření do rychlosti $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Při vyšších rychlostech již nelze zajistit spolehlivé výsledky vlivem působení aerodynamických účinků vozidel.



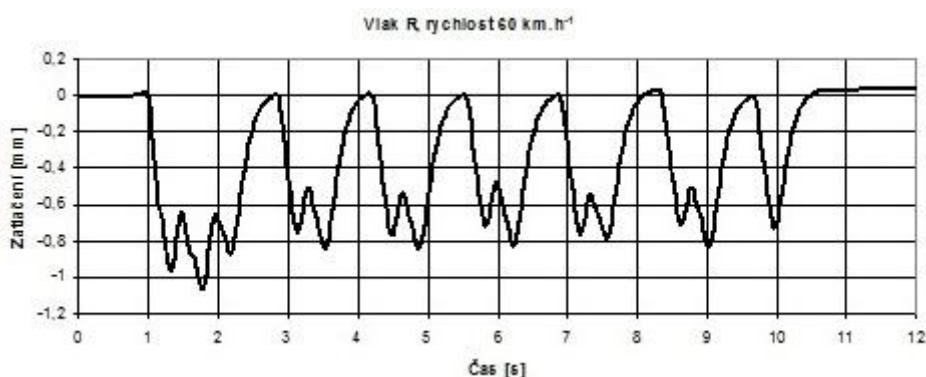
Obr. 6-13 Měřicí rám pro sledování poklesů pražců pod zatížením; zdroj: ÚŽKS

Z měřených pražců je pak vhodné vybrat ten s nejmenšími posuny. Přitom je však nutné na základě časového průběhu zatlačení zohlednit také další okolnosti. Typickým projevem nevhodného podepření může být například bilineární průběh zatlačení. Ten představuje děj, kdy vlivem působení kolové síly dochází nejprve k dotlačování pražce po jeho délce na šterkovou lavičku, která pro tento případ již vykazuje trvalou deformaci (pod pražcem jsou utvořeny volné prostory). Teprve se změnou sklonu časového průběhu zatlačení dochází k pružné deformaci konstrukce trati. Dalším nestandardním projevem mohou být výrazné zdvihové vlny, které by v případě standardního chování kolejového roštu s klasickým uspořádáním pražců ve šterku neměly překračovat hodnoty 30 % velikosti poklesů pražce. Standardní až tuhé pražcové podloží s optimální pružností se v časovém záznamu posunů projeví tak, že ze záznamu budou jako lokální minima zřetelně rozpoznatelná jednotlivá dvojkolí vlaku, viz obr. 6-14. Pro účely měření dynamicko-akustických parametrů kolejnicových upevnění je žádoucí právě tento případ. Ve špatném až velmi špatném pražcovém podloží budou z časových záznamů svislého zatlačení patrný pouze jednotlivé podvozky (obr. 6-15), resp. dvojice podvozků (obr. 6-16).

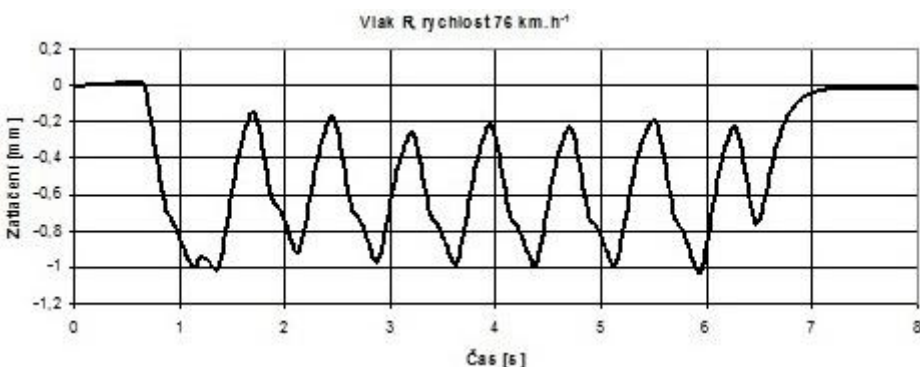
Alternativou k výše uvedenému postupu je individuální osazení indukčnostních snímačů pomocí magnetických stojánků a rámu tvořeného ocelovým nosníkem s tyčemi. Tento systém byl již podrobně popsán v kapitole 4.2.1.2. Výhodou tohoto řešení je možnost umístit čidla na větší vzdálenosti a do vybraných míst. Lze tak sledovat vlastnosti celého vybraného úseku pro měření. Je tím současně minimalizováno riziko, že žádný ze sledovaných pražců nevyhoví kritériím přijetí, kvůli vzájemnému spolupůsobení sousedních pražců. Hlavní nevýhoda pak spočívá ve vyšších časových požadavcích na osazení snímačů a v limitování z hlediska délky jejich kabeláže. Tento systém je úspěšně odzkoušen pro traťové rychlosti až $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Jeho modifikovanou verzi popsanou v kapitole 8 bude možné použít i při rychlostech vyšších.



Obr. 6-14 Časový záznam svislých pohybů hlavy pražce v kolejovém loži pod jedoucím vlakem (lokomotiva + 4 osobní vozy); standardní až tuhé pražcové podloží; zdroj: [61]



Obr. 6-15 Časový záznam svislých pohybů hlavy pražce v kolejovém loži pod jedoucím vlakem (lokomotiva + 6 osobních vozů); špatné pražcové podloží; zdroj: [61]

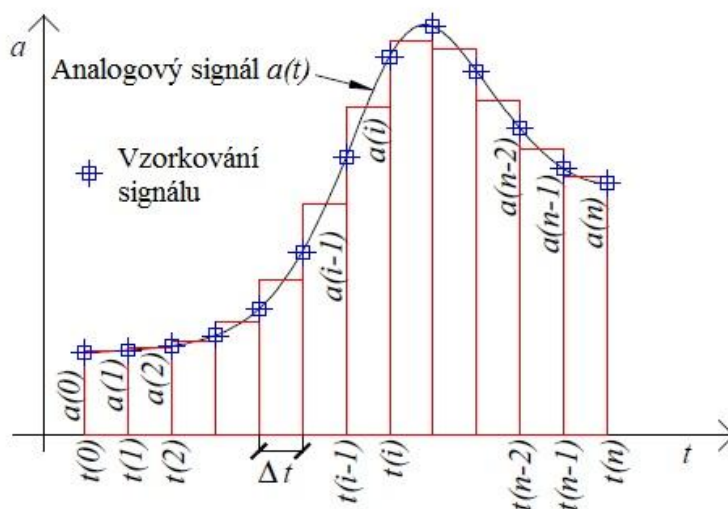


Obr. 6-16 Časový záznam svislých pohybů hlavy pražce v kolejovém loži pod jedoucím vlakem (lokomotiva + 7 osobních vozů); velmi špatné pražcové podloží; zdroj: [61]

6.4.1.2 Výpočet zatlačení pražce z jiné měřené veličiny

Vztah mezi základními veličinami charakterizujícími mechanické chvění byl již popsán v kapitole 5.2.1. Jelikož při samotné analýze pracujeme s digitalizovaným signálem, je třeba využívat principy numerické integrace. Posuny lze ze zrychlení resp. rychlosti kmitání vypočítat různými metodami (Newtonovy-Cotesovy vzorce, jakými jsou např. obdélníková, lichoběžníková a Simpsonova metoda, či jejich složené kvadrurní varianty). Všechny známé postupy však prakticky vycházejí z výpočtu plochy pod grafem časového průběhu diskretní

funkce. Obr. 6-17 znázorňuje jednoduché obdélníkové pravidlo, kde je oblast pod analogovým signálem aproximována součtem řady obdélníků. Velikost časového kroku Δt [s] pak závisí na vzorkovací frekvenci.



Obr. 6-17 Numerická integrace užitím jednoduchého obdélníkového pravidla; zdroj: autor

Integrace diskrétního signálu v časové oblasti je provedena následovně [91]:

$$\int_{t(0)}^{t(n)} a(t) dt \cong \sum_{i=1}^n \left(\frac{a(i-1) + a(i)}{2} \right) \cdot \Delta t, \quad (6-13)$$

kde $a(t)$ je analogový časový průběh zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], $a(i)$ je i -tý člen digitálního průběhu zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] a n je počet vzorků digitálního záznamu.

Výsledné posuny jsou pak vypočítány rekurzivně ve dvou krocích. Nejprve se vypočítá rychlost kmitání ze zrychlení a následně pak hledaný posun z rychlosti:

$$v(i) = v(i-1) + \frac{a(i-1) + a(i)}{2} \cdot \Delta t, \quad (6-14)$$

$$y(i) = y(i-1) + \frac{v(i-1) + v(i)}{2} \cdot \Delta t, \quad (6-15)$$

kde $a(i)$ je i -tý člen digitálního průběhu zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], $v(i)$ je i -tý člen vypočtené rychlosti [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] a $y(i)$ je i -tý člen vypočteného posunu [m].

Účelem počátečních měření, která jsem realizoval na zkušebním kolejovém roštu vybudovaném v areálu Fakulty stavební VUT v Brně, bylo nalézt vhodný způsob buzení testované konstrukce, porovnat různé typy snímačů a nalézt vhodný algoritmus výpočtu svislých zatlačení. Zkusmo bylo vysledováno, že nejlepší výsledky dostaneme, když kolejový rošt budeme budit rázem přímo na hlavě pražce. Tímto postupem se minimalizuje zkreslení signálu vlivem přechodu přes upevnění, jak tomu je v případě buzení na kolejnici. Ráz byl vybuzen rázovým kladivem Brüel & Kjær 8210 s tvrdou hlavou Hard Tip. Výhodou takového rázu je velmi krátká doba odezvy a dostatečně ploché a současně široké pásmo vybuzených

frekvencí. Budicí síla odpovídá ekvivalentu 5 kN až 15 kN. Buzená zrychlení na pražci dosahovala hodnot až $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ a svislá zatlačení pak byla v rozmezí 0,05 mm až 0,20 mm. Znamá budicí síla navíc umožňuje normování získaných výstupů, což je velmi důležité pro opakovatelnost a referenční vlastnosti dané zkoušky. Výsledky byly průměrovány vždy z deseti rázů. V rámci pokusu byly na hlavu pražce instalovány následující snímače:

- piezoelektrický akcelerometr Brüel & Kjær 4507 B 004;
- kapacitní snímač MEMS;
- snímač rychlosti Geophone;
- indukčnostní snímač WA-T/10.

Literatura [91, 92] doporučuje pro úlohy numerické integrace kapacitní snímače MEMS jako velmi vhodné, vzhledem k jejich nízkofrekvenčním charakteristikám. Snímač rychlosti byl zvolen, protože místo dvojité integrace ze zrychlení umožňuje získat hledané posuny pouze jednoduchou integrací, což výrazně snižuje chybu výpočtu. Piezoelektrický akcelerometr jsem vybral pro jeho četné použití v různých úlohách vibrodiagnostiky. Výsledky numerické integrace pak byly porovnány s relativními posuny získanými z indukčnostního snímače uchyceného prostřednictvím magnetického držáku k lehké dynamické desce volně položené do kolejového lože.



Obr. 6-18 Uspořádání pokusu v areálu Fakulty stavební VUT v Brně; zdroj: autor

Naměřené údaje byly následně zpracovány v programech FlexPro 7.0 a Microsoft Excel 2010. Algoritmus výpočtu byl po mnoha pokusech a nastaveních včetně kontroly opakovatelnosti určen následovně:

- průměrování hodnot z jednotlivých rázů kladiva;
- zobrazení časového průběhu měřených veličin;
- vhodný časový výřez;
- aproximace digitálních signálů vhodnou matematickou křivkou;
- filtrace pásmovou propustí;
- numerická integrace filtrovaného signálu;
- výpočet přenosové funkce.

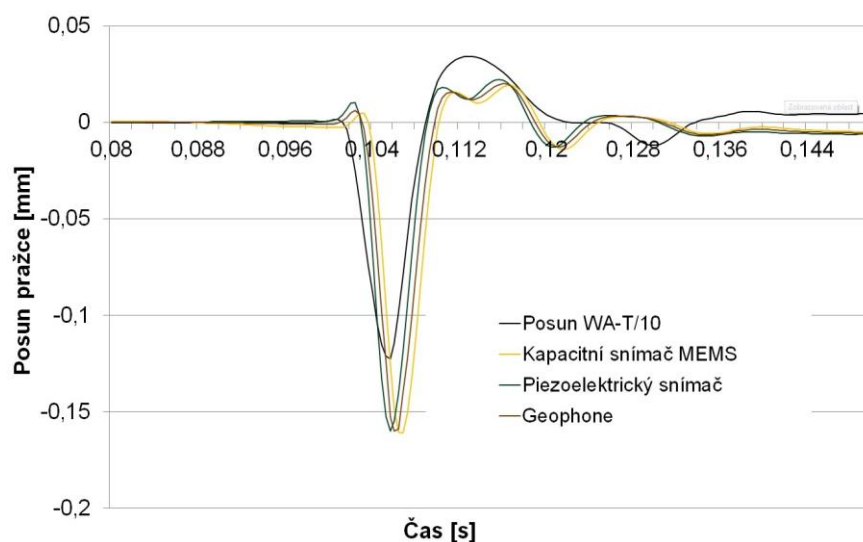
Prvním krokem normování signálů je průměrování výsledků měření. Jak již bylo zmíněno, každé měření sestávalo z deseti úderů rázového kladiva na hlavu pražce. Tím byl do značné míry omezen vliv nestandardně provedených rázů z hlediska místa či směru působení úderu apod. Aby byly výsledky ovlivněny různým způsobem úderu jen minimálně, je vhodné, aby každé měření prováděla pouze jedna osoba. Z časového zobrazení průběhu měřených veličin je pak vhodné určit správný výřez, který bude dále analyzován. Odstraní se tak přebytkové množství dat, která by jinak výpočet zbytečně zatěžovala. Při dobré predikci výsledného signálu je možné výřez přednastavit již přímo v měřicí ústředně nebo na notebooku s měřicí kartou, tzv. pre trigger a post trigger. Zde je vhodné připomenout, že ráz vybuzený úderem kladiva vyvolá odezvu v konstrukci pražce trvající v řádu 100 ms.

Pro usnadnění numerické integrace literatura doporučuje aproximovat časový průběh hodnocené veličiny vhodnou matematicky definovanou křivkou. Pro tento účel jsem zvolil periodickou splajnu, která je součástí vyhodnocovacího softwaru FlexPro 7.0. Výsledky aproximace byly vždy kontrolovány ve frekvenčním zobrazení signálu, aby se vyloučilo jeho nevyhovující zkreslení.

Nízkofrekvenční složky mají na výslednou integraci zásadní vliv. Projevují se zde jevy přímo nesouvisející s chováním konstrukce, jakým je např. teplotní drift čidel, apod. V případě zachování nízkofrekvenčních složek v analyzovaném signálu pak vlivem integrace dochází k výraznému zkreslení jejích výsledků. Pokusným filtrováním a kontrolou s měřeními posuny pražce byla nakonec zvolena pásmová propust 5 Hz až 1000 Hz. Frekvence nad 1000 Hz nemají již na vypočtené hodnoty posunů prakticky žádný vliv. Navíc se nacházejí výrazně mimo pracovní rozsah rázového kladiva, který byl v mém případě přibližně 800 Hz. Pro filtrování signálu jsem vybral FIR filtr s konečnou impulsní odezvou.

Numerická integrace v programu FlexPro 7.0 je založená na obdélníkovém pravidle uvedeném na začátku této kapitoly. Pro výpočet posunů z rychlosti kmitání byla provedena jednoduchá integrace a pro zjištění posunů ze zrychlení pak integrace dvojité. Výsledky integrace a jejich porovnání s měřeními posuny jsou patrné z obr. 6-19. Rozdíl mezi měřeními relativními posuny a vypočtenými posuny ze zrychlení a rychlosti kmitání činí cca 10 %. Mezi jednotlivými typy snímačů zrychlení a rychlosti kmitání nebyly zaznamenány výraznější rozdíly. K dalším pracím byl proto vybrán piezoelektrický snímač, pro jeho výhodné vlastnosti popsané již v kapitole 4.1.3.

Druhým a hlavním krokem normování je pak výpočet přenosové funkce. Vstupní veličinou přenosové funkce je známé silové působení rázového kladiva. Výstupní veličinou jsou pak vypočtené posuny. Jedná se tedy o přenosovou funkci receptance, jejíž převrácená hodnota odpovídá dynamické tuhosti. Zde je vhodné poznamenat, že vlivem aproximace časového průběhu zrychlení a rychlosti kmitání došlo k navýšení vzorkovací frekvence. Toto je nutné zohlednit také u neintegrované vstupní veličiny síly, neboť výpočet přenosové funkce vyžaduje stejnou vzorkovací frekvenci pro vstupní i výstupní signál. Na základě známého tvaru receptance či dynamické tuhosti lze již rozhodnout o vhodnosti daného pražce pro uskutečnění zkoušky, jak bude uvedeno dále.

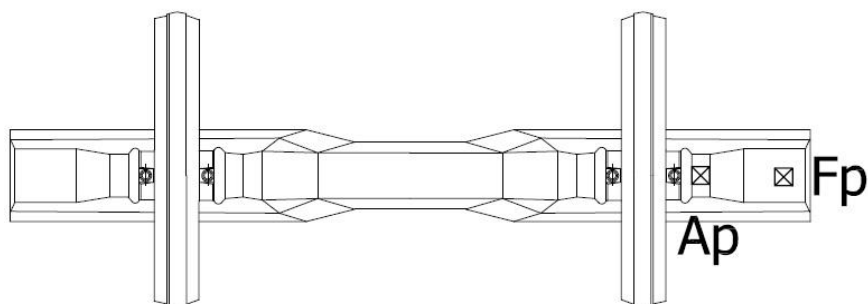


Obr. 6-19 Porovnání vypočtených svislých posunů pražce s relativními posuny získanými z indukčnostního snímače; zdroj: autor

Dalším stádiem bylo nalezení vhodných měřicích úseků pro zkoušku in situ. Základním předpokladem pro výběr byla dobrá znalost daného místa (popis geometrie koleje, výsledky měření GPK, apod.). Hledané úseky koleje musely svými parametry odpovídat parametrům rekonstruované trati, trati provozované v dobrém stavu i trati ve špatném technickém stavu. Bylo to za účelem nalezení závislosti mezi výsledky měření a kvalitou pražcového podloží. Daná místa navíc měla mít srovnatelné vlastnosti podloží. Optimálně se proto měla nacházet blízko sebe. Nakonec byly vybrány následující úseky splňující všechny výše uvedené požadavky:

- trať č. 250, TÚ Modřice – Horní Heršpice, km 137,590, kolej č. 2, soustava UIC 60, pružné upevnění, dobrá kvalita pražcového podloží;
- trať č. 250, TÚ Modřice – Horní Heršpice, km 138,220, kolej č. 2, soustava UIC 60, pružné upevnění, výborná kvalita pražcového podloží (zrekonstruovaný úsek);
- trať č. 250, žst. Horní Heršpice, km 0,510, kolej č. 96, soustava R65, tuhé upevnění, špatná kvalita pražcového podloží.

Ve všech třech případech se jedná o přímé úseky trati. Měření byla uspořádána dle obr. 6-20 a tab. 6-1. Ostatní parametry zkoušky zůstaly totožné s počátečním měřením z areálu Fakulty stavební VUT v Brně, které je popsáno výše.



Obr. 6-20 Schéma uspořádání měření; zdroj: autor

Označení kanálu	Umístění snímače a další specifikace	Použitý typ snímače
Ap	Pražec; svisle; snímač je umístěn na hlavě pražce 185 mm od stojiny kolejnice nebo co nejbližší k uzlu upevnění; včelí vosk;	Brüel & Kjær 4507 B 004
Fp	Rázové kladivo; buzení ve svislém směru 10 úderů na hlavě pražce; hlava Hard Tip;	Brüel & Kjær, type 8210 Impact Hammer

Tab. 6-1 Specifikace měřených kanálů; zdroj: autor



Obr. 6-21 Úsek s dobrou kvalitou pražcového podloží, km 137,590; zdroj: autor



Obr. 6-22 Nově zrekonstruovaný úsek, km 138,220; zdroj: autor

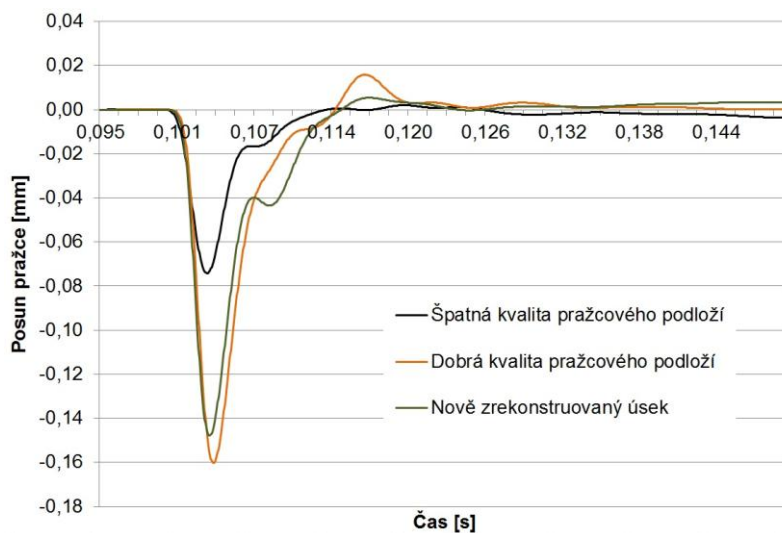


Obr. 6-23 Úsek se špatnou kvalitou pražcového podloží, km 0,510; zdroj: autor

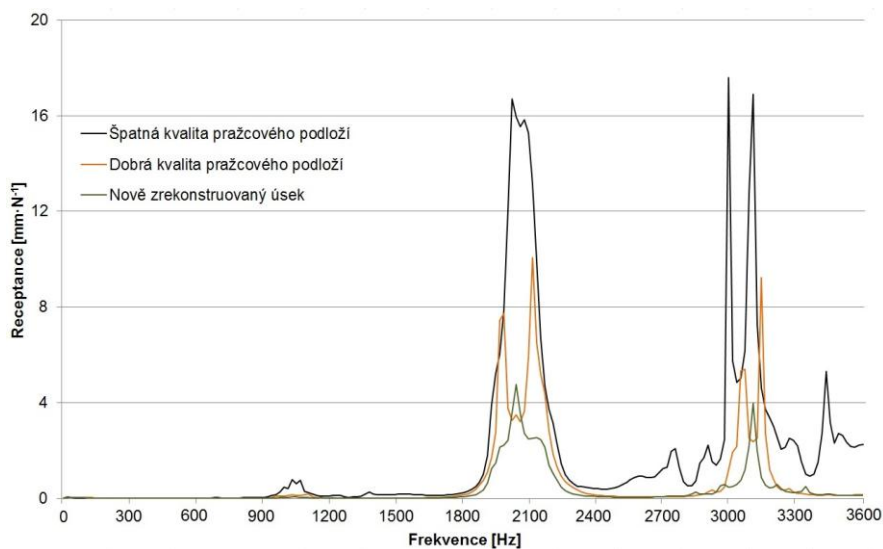
Obr. 6-24 znázorňuje časové průběhy vypočítaných zatlačení pražce srovnávaných úseků koleje. V koleji se špatnou kvalitou pražcového podloží jsou vyvozeny výrazně menší posuny pražce, než je tomu ve zbylých dvou úsecích. Při úderu kladiva zde dochází ke zpružení kolejového roštu, který vlivem špatného podloží neklade takový odpor, jako je tomu v ostatních dvou případech. V soustavě tak nelze vybudit odpovídající ráz, čímž na pražec působí menší budicí síla. Bez znalosti této síly by tak z uvedeného grafu bylo možné mylně interpretovat, že úsek se špatnou kvalitou pražcového podloží vykazuje ze všech měřených míst neoptimálnější vlastnosti.

Z toho důvodu je nutné průběhy vypočtených zatlačení normovat známou budicí silou. Normování bylo provedeno výpočtem přenosové funkce receptance, viz obr. 6-25. V grafech receptance již dominuje právě úsek se špatnou kvalitou pražcového podloží. Lokální maxima receptance nám určují, při jakých frekvencích je možné s přispěním minimálního silového účinku vybudit velké poklesy pražce.

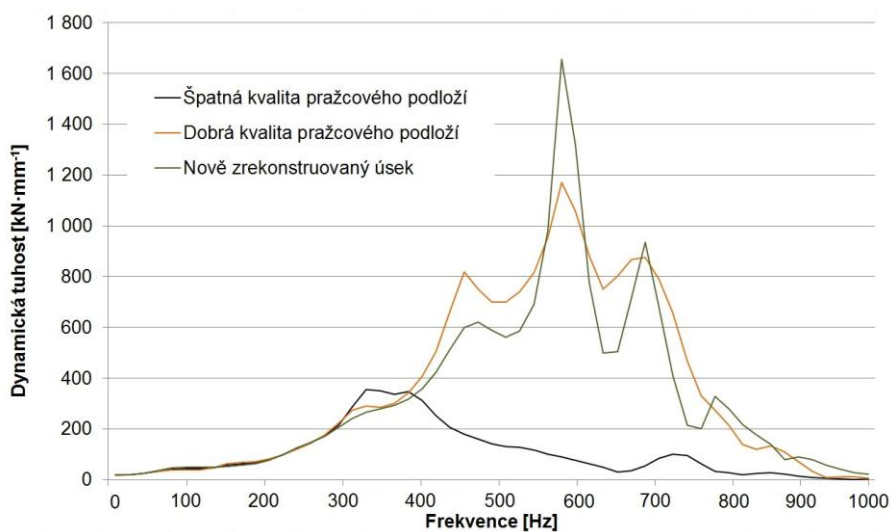
Převrácenou hodnotou receptance je pak možné získat frekvenční průběh dynamické rázové tuhosti. Z obr. 6-26 je patrné, že maximálních hodnot dosahuje dynamická rázová tuhost při frekvencích 300 Hz až 380 Hz pro velmi špatnou kvalitu pražcového podloží, resp. při frekvencích 450 Hz až 700 Hz. Takto vysoké frekvence není možné konvenčním laboratorním zkušebním zařízením ani měřicími a budicími prostředky in-situ popsány v závěru kapitoly 6.4 vybudit. Z toho důvodu jsou efektivní hodnoty dynamické rázové tuhosti vypočítané mojí metodikou (tab. 6-2) vyšší oproti běžným hodnotám uváděným v literatuře. Pro účely výběru vhodného měřicího profilu je však tato skutečnost bezpředmětná. Statistickým vyhodnocením dat ze všech uskutečněných měření popsanych v kapitole 7 lze za vyhovující považovat pražce, u kterých je efektivní hodnota dynamické rázové tuhosti min. $250 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$. Tato efektivní hodnota je přitom počítána do frekvence 1000 Hz s ohledem na pracovní rozsah použitého rázového kladiva. Mez pro přijetí je platná jak pro betonové, tak i pro testované ocelové pražce tvaru Y. V případě ocelových pražců vycházejí hodnoty dynamických rázových tuhostí obecně nižší, než je tomu u pražců betonových.



Obr. 6-24 Vypočítané svislé posuny pražce srovnávaných úseků koleje; zdroj: autor



Obr. 6-25 Receptance srovnávaných úseků koleje; zdroj: autor



Obr. 6-26 Dynamická rázová tuhost srovnávaných úseků koleje; zdroj: autor

Popis úseku	Zjištěná efektivní hodnota dynamické rázové tuhosti do frekvence 1000 Hz [kN·mm ⁻¹]	Dolní mez pro přijetí pražce [kN·mm ⁻¹]	Posouzení pražce pro přijetí
trať č. 250, TÚ Modřice – Horní Heršpice, km 137,590, kolej č. 2, soustava UIC 60, pružné upevnění, dobrá kvalita pražcového podloží	488	250	vyhovuje
trať č. 250, TÚ Modřice – Horní Heršpice, km 138,220, kolej č. 2, soustava UIC 60, pružné upevnění, výborná kvalita pražcového podloží (zrekonstruovaný úsek)	468		vyhovuje
trať č. 250, žst. Horní Heršpice, km 0,510, kolej č. 96, soustava R65, tuhé upevnění, špatná kvalita pražcového podloží	141		nevyhovuje

Tab. 6-2 Efektivní hodnoty dynamické rázové tuhosti srovnávaných úseků koleje; zdroj: autor

7. Realizace a vyhodnocení měření

Tato kapitola je věnována popisu vlastního měření a vyhodnocení získaných dat. Všechna měření byla koncipována jako srovnávací, dle metodiky a parametrů popsaných v kapitole 4. Výběr vhodného měřicího stanoviště a konkrétního měřicího profilu in-situ byl prováděn dle zásad uvedených v kapitole 4.2.5 a v kapitole 6. Vlastní měření byla realizována v letech 2007 až 2015 v lokalitách a na konstrukcích železničního svršku, viz kapitola 1.4 a text níže. Celkem bylo takto uskutečněno přes třicet měření. K vyhodnocení in-situ byly použity pouze záznamy od reprezentativních vozidel. Pozornost byla věnována zejména srovnatelné jízdní rychlosti nebo vyvolanému nedostatku převýšení v koleji v oblouku, uspořádání náprav a nápravovému zatížení. Vyhodnocení měření je provedeno ve třech rovinách – v časové, ve frekvenční a v časově-frekvenční. Vyhodnocení jsou založena na metodě přehledových tabulek a grafů, kdy z globálních výstupů měření byly určeny vybrané reprezentativní parametry. K měřením je vyhotovena přílohová část obsahující vybrané grafy, tabulky a fotodokumentaci.

7.1 Laboratorní měření

Měřeními v laboratoři lze věrohodně popsat silné a slabé stránky testovaných upevnění. Současně je možné predikovat jejich chování v reálné koleji před samotným zhotovením nebo výměnou železničního svršku. Výsledky měření poskytují rovněž cenné informace pro práci s výpočtovými modely jako např. vlastní frekvence, tvar vlastního kmitu nebo poměrný útlum. Mohou tak při relativně nízkých finančních a časových nákladech odhalit případné problémy a napomoci v optimalizaci konstrukčního řešení uzlu upevnění. Vzhledem k rychlosti, vhodnému nastavení a dobré opakovatelnosti zkoušky je možné vícenásobným měřením získat ve velmi krátkém čase statisticky významné výsledky.

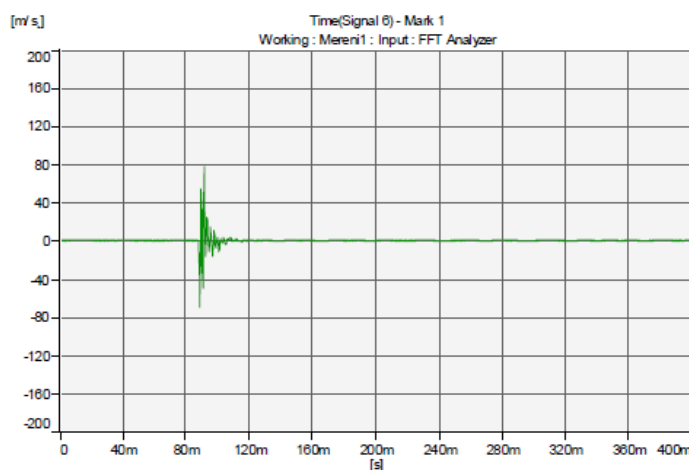
První laboratorní měření bylo uskutečněno v prostorách laboratoře ÚŽKS ve dnech 16. až 20. 3. 2012. V rámci měření byly zjišťovány a následně srovnávány dynamické charakteristiky upevnění kolejnic FC I, W 14, W 14NT, W 21NT a E 14. V rámci měření byly dále porovnávány různé způsoby buzení testovaných konstrukcí, vliv dotažení vrtule upevnění a vliv stárí podložky pod patu kolejnice. Další měření bylo uskutečněno dne 5. 6. 2015 ve venkovních prostorách Fakulty stavební VUT v Brně, v místě s vloženým kolejovým polem. V rámci této zkoušky byly ověřovány vlastnosti upevnění W 28NT. Pro srovnání zkušebních podmínek vůči předcházejícímu měření byly znovu odzkoušeny také systémy upevnění W 14NT a W 21NT. Je důležité podotknout, že upevnění W 28NT bylo testováno v odlišné skladbě od předpisové uvedené na obr. 1-22. Byly použity úhlové vodící vložky Wfp 21 K NT-12 ze sestavy W 21NT. V počátcích ověřování v rámci provozu v České republice se používala právě tato sestava upevnění W 28NT, než bylo rozhodnuto o vývoji nové vodící vložky Wfp 21 K 700NT. Ta má, oproti původní, sníženou tloušťku vodící lišty, která lépe vyhovuje nižší a tužší podložce pod patu kolejnice.

Naměřená data byla zpracována pomocí programu ME'Scope, který data z analyzátoru zpracoval do formy přenosových funkcí nebo v případě buzení elektrodynamickým budičem do funkcí spekter. Program ME'Scope je založen na principech modální analýzy a je

vhodným nástrojem pro řešení tohoto problému. Data získaná programem ME'Scope byla exportována jako textový soubor a poté programem Excel uspořádána do skupin grafů. Tento program byl taktéž nástrojem pro získání hodnot poměrného útlumu. Tlumení testovaných struktur bylo určeno pomocí bodů s polovičním výkonem. Pro vyhodnocení v časové oblasti byl použit přímo software měřicího zařízení. Podrobné výstupy z laboratorního měření jsou součástí přílohy A. Jedná se o zprůměrované hodnoty získané ze série opakovaných měření, jak je uvedeno v kapitole 4.1.5.

7.1.1 Časová analýza

Časová analýza signálu sloužila pouze jako doplněk k frekvenční analýze. Byly jí sledovány funkce rychlosti kmitání v čase. Úderem kladiva do temene kolejnice dochází k rozvoji vibrací. Tyto vibrace jsou časem utlumeny. Nejlépe je tento proces patrný na signálu z paty kolejnice Ak. Příklad časového záznamu buzení konstrukce je znázorněn na obr. 7-1.



Obr. 7-1 Časový průběh buzení rázovým kladivem; upevnění Vossloh W 14; kolejnice; zdroj: autor

7.1.2 Frekvenční analýza

Vlastní vyhodnocení bylo zaměřeno na nízkofrekvenční oblast $0 \div 80$ Hz, středněfrekvenční oblast $80 \div 400$ Hz a vysokofrekvenční oblast $400 \div 1000$ Hz. Toto rozdělení je v souladu s ostatními měřeními a je založeno na principu, že v oblasti nízkých frekvencí se projevují zejména účinky vyvolané působením podvozků a dvojkolí jedoucích železničních vozidel, pásmo středních frekvencí je projevem imperfekcí na stykové ploše kolo – kolejnice stejně tak, jako vysokofrekvenční oblast do 1000 Hz. Zde se však navíc přidává vliv akustických jevů zapříčiněných pohybem vozidla.

V pásmu nízkých frekvencí vykazují všechna upevnění výraznější odezvu mezi 60 Hz a 85 Hz. Nejvýraznější poměrný útlum na kolejnici cca 10,9 % zde dosahuje upevnění W 28NT, nejmenší 0,8 % naopak upevnění E 14. Vysoký poměrný útlum upevnění W 28NT je s největší pravděpodobností zapříčiněn vodící lištou na spodní ploše úhlové vodící vložky, která brání větším pohybům kolejnice. Obdobné výsledky jsou získány také pro upevnění W 14NT. Naopak upevnění E 14 je charakterizováno zvýšenou svislou pružností, která může

mít za následek vyšší vibrace na kolejnici. Na pražci bylo největší strukturální tlumení 12,5 % zaznamenáno taktéž na upevnění W 28NT, nejmenší pak na FC I, resp. W 14NT (shodně 3,1 %). Rozdíl mezi útlumem na kolejnici a na pražci nám může indikovat svislou tuhost upevnění. Jako upevnění s nejmenší svislou tuhostí lze proto definovat upevnění E 14 a W 21NT. Získaný poměrný útlum $4,3 \pm 2,2$ % v kolejovém loži naznačuje, že zhutněná vrstva šterku vytvořila pro všechny zkoušené sestavy upevnění stabilní podklad. Odchylně od těchto hodnot působí pouze upevnění W 28NT, kde však byly v důsledku nuceného přesunutí zkoušky do venkovních prostor fakulty pravděpodobně mírně změněny podmínky uložení. Tlumení ve šterkovém loži zde dosahuje průměrných hodnot 15,6 %.

Pro upevnění FC I nejsou na kolejnici v pásmu středních frekvencí zjištěny žádné významnější poměrné útlumy. Křivka akceleraace zde totiž nemá žádné výrazné vrcholy. Na pražci jsou důležitou frekvenční oblastí upevnění Pandrol kmitočty $145 \div 165$ Hz, kde dosahuje průměrného útlumu 4,0 %. V kolejovém loži nebylo většího útlumu na středních frekvencích dosaženo. Ani na kolejnici u upevnění W 14 nebyla nalezena žádná výrazná frekvence. Na pražci průměrně dosahuje toto upevnění poměrného útlumu 2,9 %. Důležité je v tomto ohledu zejména pásmo $110 \div 215$ Hz. Ve šterku bylo vypočteno tlumení 6,4 % na kmitočtech $115 \div 155$ Hz. Upevnění W 14NT vykazuje na vybraných frekvencích v pásmu $110 \div 340$ Hz poměrné útlumy 4,0 % na kolejnici, 3,4 % na pražci, resp. 4,2 % v kolejovém loži. V případě upevnění W 21NT je zásadní rezonanční frekvence 290 Hz. Upevnění zde vykazuje poměrné útlumy 7,3 % na kolejnici, 6,3 % na pražci a 7,4 % ve šterku. Další spektrum frekvencí $130 \div 145$ Hz již není tolik významné, konstrukce zde dosahuje tlumení 4,5 %. Konstrukce E 14 vykazuje vysoká rezonanční pásma $120 \div 130$ Hz s poměrnými útlumy 3,6 % na kolejnici, 3,1 % na pražci a 3,9 % v kolejovém loži. Ještě výraznější poměrné útlumy cca 5,2 % byly získány na kmitočtu $220 \div 265$ Hz. Pro upevnění W 28NT jsou v pásmu středních frekvencí charakteristické průměrné útlumy 6,2 % na kolejnici, 7,0 % na pražci a 9,0 % v kolejovém loži. Jedná se o široké pásmo kmitočtů $100 \div 330$ Hz. Celkově lze z chování srovnávaných konstrukcí upevnění odhalit, že s rostoucí svislou pružností upevnění roste také velikost amplitud rezonančního pásma v oblasti středních frekvencí $80 \div 400$ Hz. Nejméně příznivě v tomto ohledu vyznívá upevnění W 21NT, upevnění FC I, resp. upevnění E 14.

V pásmu vyšších frekvencí $400 \div 1000$ Hz je pro upevnění FC I důležitá frekvence 430 Hz, kde vycházejí průměrné útlumy 2,6 % a v kolejovém loži navíc frekvence $630 \div 730$ Hz s vypočteným tlumením 1,9 %. V případě upevnění W 14 bylo zjištěno tlumení na velké řadě kmitočtů vysokofrekvenční oblasti. Pouze hodnoty z oblasti $450 \div 500$ Hz a $600 \div 700$ Hz však vycházejí vyšší než 1,0 %. U upevnění W 14NT byly nalezeny poměrné útlumy ve frekvenčním pásmu $510 \div 600$ Hz v průměru 1,5 %. V kolejovém loži pak bylo navíc zjištěno vnitřní tlumení 3,3 % odpovídající frekvencím $410 \div 445$ Hz. Průměrné hodnoty útlumu 1,9 % byly vypočteny pro systém upevnění W 21NT. Uvedeného poměrného útlumu bylo dosaženo na frekvencích $415 \div 445$ Hz. Druhou významnou frekvencí je 562 Hz, kde bylo zjištěno tlumení 3,3 %. Upevnění E 14 nevykazovalo ve zvoleném pásmu frekvencí $400 \div 1000$ Hz žádné významnější poměrné útlumy překračující hodnoty 0,5 %. Pro upevnění W 28NT je klíčová frekvence 590 Hz. Na kolejnici zde dosahují útlumy hodnot 4,2 %, na pražci 4,4 % a ve šterku 4,7 %. Dalším významným pásmem jsou frekvence $670 \div 900$ Hz,

kde se útlumy pohybují nejčastěji v hodnotách kolem 2,0 % až 3,0 %, v kolejovém loži pak až 4,0 %. V pásmu vyšších frekvencí vykazují všechna testovaná upevnění horší schopnost tlumení vibrací, než v pásmech pod 400 Hz. Výjimku zde představuje upevnění W 28NT, které má však do tohoto pásma zasazeny hlavní rezonanční frekvence v úzkém pásmu kolem 590 Hz. Toto upevnění zde vykazuje ze všech testovacích konstrukcí nejvyšší amplitudy zrychlení vibrací na pražci a v kolejovém loži. Méně příznivě působí také upevnění W 14NT v oblasti 510 Hz ÷ 600 Hz.

Z průběhů frekvenčních odezvových funkcí, resp. normovaného amplitudového spektra zrychlení vibrací lze vyčíslením plochy mezi křivkami A_k a A_p orientačně stanovit charakteristiky testovaných uzlů upevnění z hlediska jejich tuhosti, lépe řečeno z hlediska relativních zrychlení vibrací kolejnice vůči pražci ve svislém směru. V pásmu nízkých frekvencí do 80 Hz je dobře patrná přítomnost vodící lišty na spodní ploše úhlové vodící vložky upevnění W 14NT, W 21NT a W 28NT, která zapříčiňuje velmi malé plochy mezi danými křivkami v tomto frekvenčním pásmu – relativní svislá zrychlení kmitání kolejnice vůči pražci jsou minimální. V celkovém frekvenčním měřítku pak vycházejí největší rozdíly mezi křivkami A_k a A_p u upevnění E 14, nejmenší pak u upevnění W 14. Měření tak orientačně potvrdilo statické sečné tuhosti testovaných sestav upevnění uvedených v kapitole 1.4.

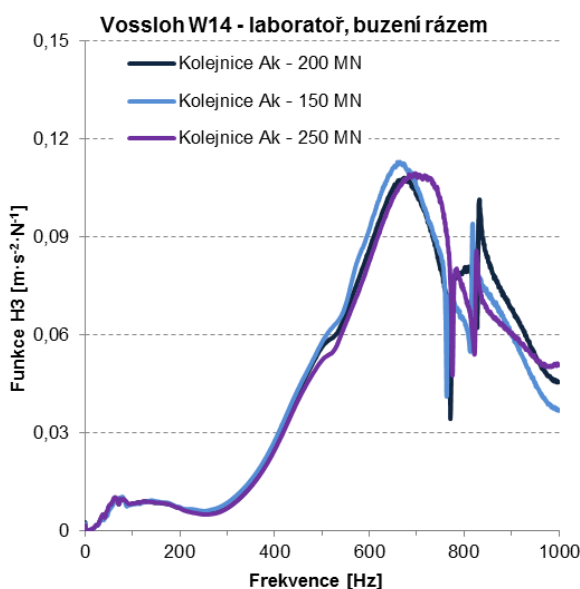
Upevnění FC I vykazuje zajímavé vlastnosti v rezonančním pásmu kolem frekvence 430 Hz. Tato frekvence bývá projevem vlnkovitosti s délkou vlnek cca 70 ÷ 90 mm v závislosti na jízdní rychlosti, která je pro tento případ uvažována v rozmezí typickém pro koridorové tratě, tj. 120 ÷ 160 km·h⁻¹ (RP 3). Použití upevnění Pandrol na tratích, kde hrozí vznik vlnkovitosti s uvedenou vlnovou délkou, může urychlit rozvoj této kolejnicové vady. Typickým místem výskytu vlnkovitosti jsou přímé úseky koleje a oblouky o velkém poloměru a to zejména v oblastech, kde se brzdí [93].

Další výraznou charakteristiku vykazuje upevnění W 21NT na středních frekvencích kolem 290 Hz, resp. upevnění E 14 na frekvencích v pásmu 220 ÷ 265 Hz. To může zapříčinit prudký rozvoj skluzových vln na tratích s rychlostí cca 100 ÷ 120 km·h⁻¹. Ve vyšším rychlostním pásmu se již skluzové vlny nepředpokládají. Nejsou zde totiž směrové oblouky s poloměry do 700 m a velkým převýšením, které jsou pro výskyt skluzových vln typické. Pravděpodobnost výskytu skluzových vln se zvyšuje s častým přibrzdováním drážní dopravy, k čemuž dochází zejména v úsecích před železničními stanicemi a zastávkami. Při rychlostech do 100 km·h⁻¹ lze zejména u upevnění W 21NT očekávat možný rozvoj vlnkovitosti koleje s vlnovou délkou přímo úměrnou jízdní rychlosti.

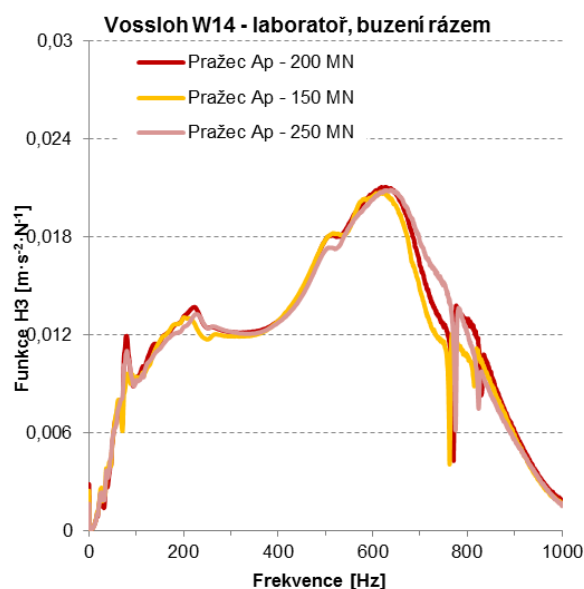
Prudký rozvoj vlnkovitosti na tratích v RP 3 lze očekávat u upevnění W 28NT, kde nabývá zásadního významu frekvence 590 Hz. Ze všech testovaných struktur zde dochází k nejvýraznějším rezoncím ve všech sledovaných úrovních na kolejnici, na pražci i v kolejovém loži. Kritická je vlnkovitost vlnové délky 55 mm až 75 mm. Podružnou frekvencí je pak pro toto upevnění 750 Hz. U testovaných upevnění s největší statickou sečnou tuhostí W 14 a W 14NT je patrný posun nejdůležitějších rezonančních pásem směrem k vyšším frekvencím. U W 14 se jmenovitě jedná o pásmo 630 ÷ 670 Hz a frekvenci 850 Hz. V případě W 14NT jsou důležité frekvence 570 Hz a 800 Hz.

Při porovnání výsledků laboratorního měření pomocí různých metod buzení bylo možné vypočítat určitý vliv umístění elektrodynamického budiče přímo na testované struktuře. Projevoval se na frekvencích $530 \div 570$ Hz. Globálně však bylo možné tento vliv na měření zanedbat. Pro porovnávací měření je však vždy nutné vybrat pouze jeden z nabízených způsobů buzení. Průběh frekvenčních přenosových funkcí je totiž odlišný. V obecnosti lze říci, že elektrodynamický budič nemá tak široký frekvenční rozsah jako rázové kladivo.

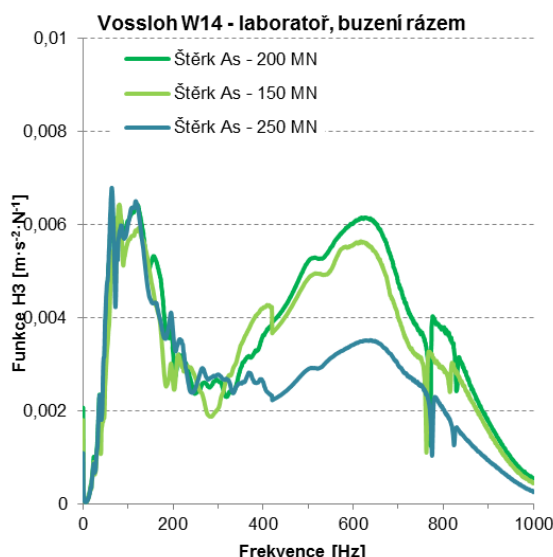
V rámci laboratorních zkoušek buzení rázem byl mj. testován vliv tvaru frekvenční odezvy funkce na velikosti utahovacího momentu vrtule upevnění. Výsledky neprokázaly pro utahovací momenty 150 – 200 – 250 MN funkční zákonitost ve změně průběhu frekvenční odezvy funkce. Nedotažená, resp. přetažená vrtule neměla tendenci vliv na dynamické chování zkoušených typů upevnění Vossloh, viz příklad pro upevnění W 14 na obr. 7-2 až obr. 7-4.



Obr. 7-2 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W 14 v závislosti na dotažení vrtule; kolejnice; zdroj: autor

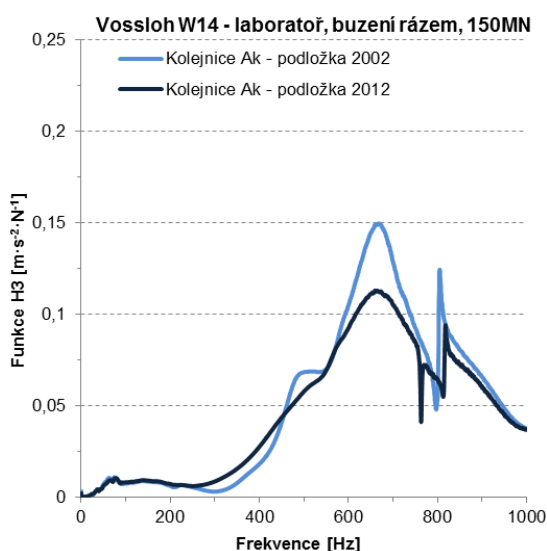


Obr. 7-3 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W 14 v závislosti na dotažení vrtule; pražec; zdroj: autor

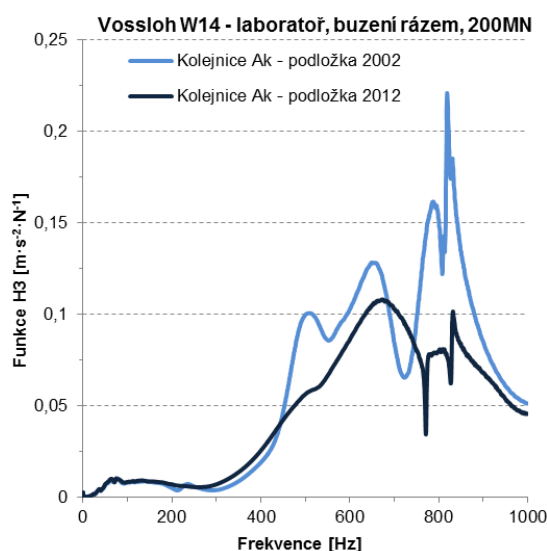


Obr. 7-4 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W 14 v závislosti na dotažení vrtule; štěrk; zdroj: autor

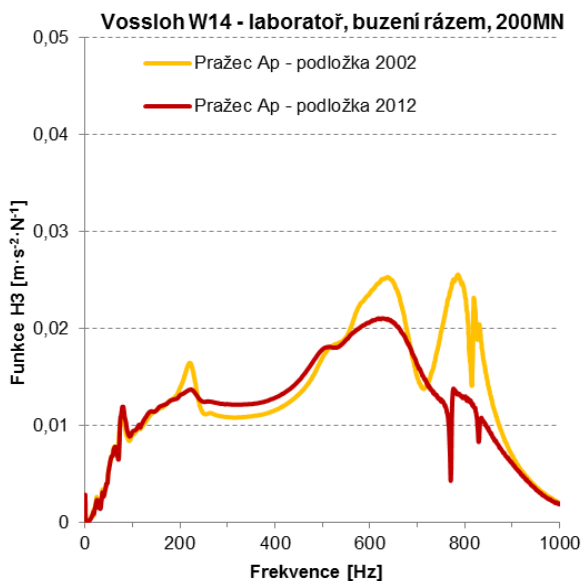
Při posuzování vlivu stáří podložky pod patu kolejnice na změnu dynamických charakteristik upevnění je možné pozorovat nárůst dynamických účinků v oblasti nad 500 Hz u kolejnice a pražce a v oblasti nad 250 Hz ve štěrku. Tento nárůst není závislý na různých hodnotách utahovacího momentu vrtule, viz obr. 7-5 až obr. 7-9. Je vhodné podotknout, že uvedené platí pro upevnění W 14, kdy byly mezi sebou porovnávány pryžové podložky pod patu kolejnice WU 7. Starší podložka byla vyrobena v roce 2002, zatímco mladší je z roku 2012. Hodnoty vypočtených útlumů vycházejí při těchto frekvencích zpravidla o 20 % až 40 % menší u starší podložky vůči útlumům podložky z roku 2012, viz tab. 7-1. Literatura [25, 26] uvádí, že vhodnějším materiálem vůči ztrátě výchozích parametrů podložek vlivem stárnutí mohou být namísto pryže různá syntetika.



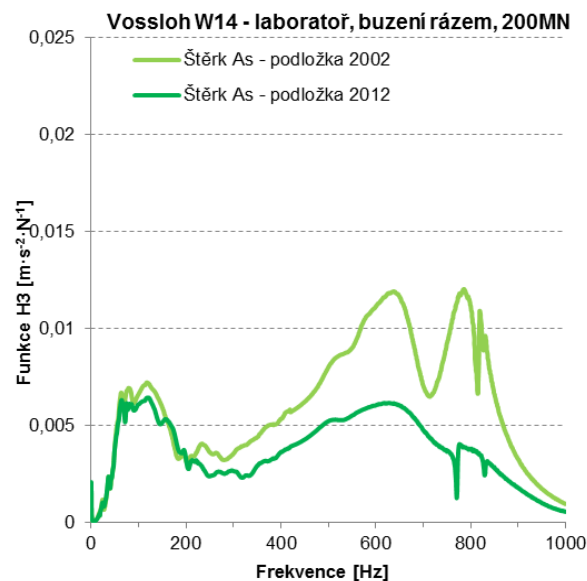
Obr. 7-5 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W 14; nedotažená vrtule; kolejnice; zdroj: autor



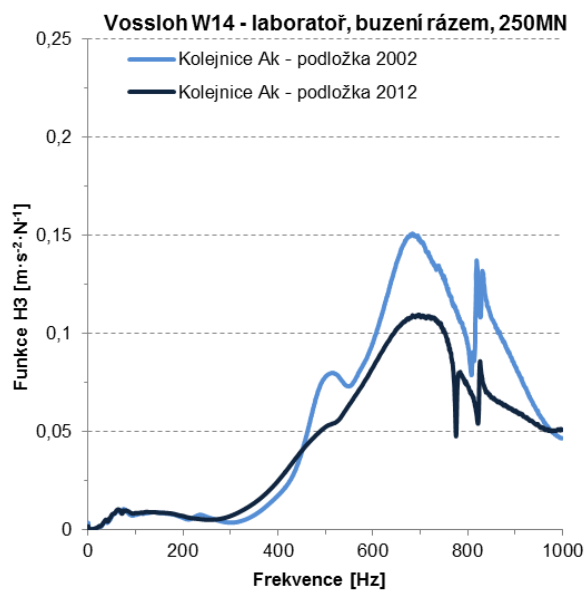
Obr. 7-6 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W 14; předpisově dotažená vrtule; kolejnice; zdroj: autor



Obr. 7-7 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W 14; předpisově dotažená vrtule; pražec; zdroj: autor



Obr. 7-8 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W 14; předpisově dotažená vrtule; štěrk; zdroj: autor



Obr. 7-9 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W 14; přetažená vrtule; kolejnice; zdroj: autor

Upevnění Vossloh W 14				
Snímač	Laboratoř, buzení rázem, podložka 2012		Laboratoř, buzení rázem, podložka 2002	
	f [Hz]	Útlum [%]	f [Hz]	Útlum [%]
Kolejnice Ak	72	2,3	81	1,1
	128	2,3	113	3,0
	-	-	224	0,5
	497	0,4	495	0,2
	646	0,2	644	0,1
	772	0,3	780	0,3
	830	0,2	817	0,3
	905	0,1	-	-
Pražec Ap	74	6,1	67	2,4
	96	3,2	73	7,6
	112	3,7	117	6,4
	215	3,1	-	-
	499	6,9	519	1,9
	633	0,5	658	0,1
	772	0,3	776	0,1
	831	0,2	818	0,3
	834	0,1	-	-
Kolejové lože As	40	1,6	37	3,5
	72	4,5	62	2,2
	85	2,2	-	-
	146	4,2	163	0,5
	222	0,3	229	0,2
	-	-	331	0,5
	-	-	411	0,1
	500	0,4	569	0,3
	699	0,2	657	0,3
	751	0,1	750	0,1
	821	0,1	806	0,1

Tab. 7-1 Útlumové charakteristiky upevnění Vossloh W 14 v závislosti na stáří podložky pod patu kolejnice; zdroj: autor

7.1.3 Shrnutí

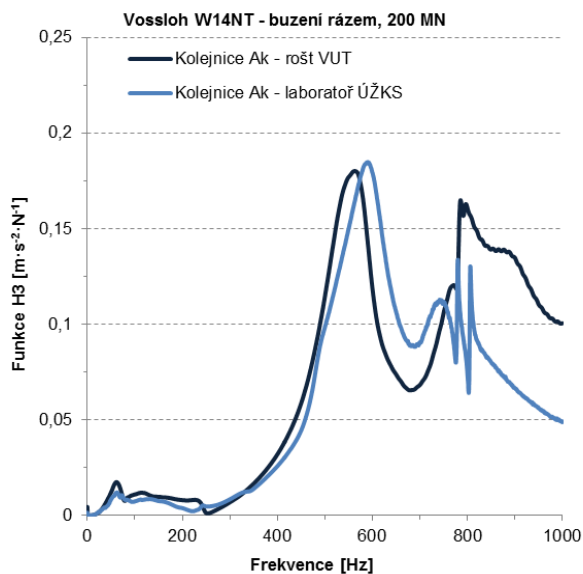
Uskutečněná laboratorní měření prokázala stabilní vlastnosti všech zkoušených typů upevnění pro danou oblast zkoušení. Byla odhalena závislost na velikosti statické sečné tuhosti a rezonanční oblasti jednotlivých systémů upevnění. Čím je upevnění tužší, tím se oblast nejvýznamnějších kmitočtů přesouvá směrem k vyšším frekvencím. Z uvedeného lze učinit závěr, že např. v České republice provozně ověřované upevnění typu W 21NT v kombinaci s vysoce pružnou podložkou pod patu kolejnice Zw 1000/150 HS-35 nelze doporučit do oblouků s malými poloměry, kde hrozí vznik skluzových vln u tratí v rychlostním pásmu RP2. Skluzové vlny jsou při jízdních rychlostech $100 \div 120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

významným přispěvatelem k úrovni zrychlení vibrací ve středněfrekvenčním pásmu $80 \div 400$ Hz. Díky svým vlastnostem by tedy upevnění W 21NT mohlo v tomto rychlostním pásmu přispět k rychlejšímu rozvoji uváděné kolejnicové vady. Vývojově mladší typ upevnění W 28NT s podložkou Zw 700NT/139/160-60 vykazuje v oblasti frekvencí do 400 Hz velmi dobré vlastnosti. Rezonanční pásmo tohoto upevnění je posunuto k hranici 590 Hz. Dynamické účinky jsou zde ze všech testovaných typů upevnění nejvýraznější. To může přispět jednak k vyšší akustické zátěži v okolí trati, ale zejména pak k urychlenému rozvoji vlnkovitosti. Při použití tohoto typu upevnění je tedy velmi důležité dbát na preventivní údržbu pojezdné plochy kolo-kolejnice. U ostatních typů zkoušených upevnění lze na základě získaných dat potvrdit vhodnost použití pro předepsané oblasti použití uvedené v kapitole 1.4.

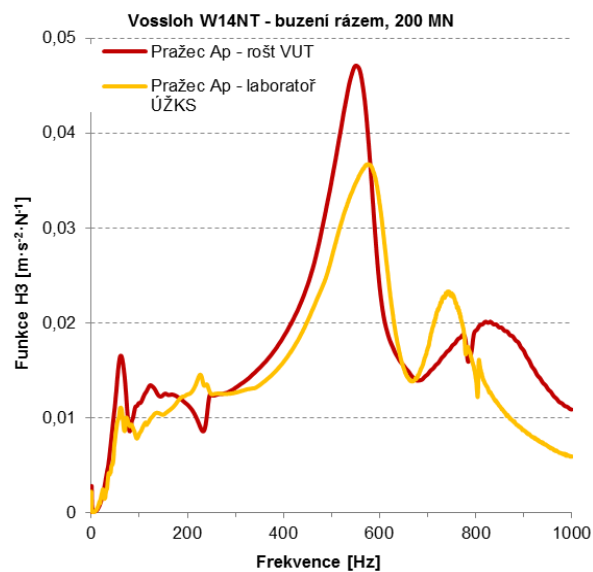
Platí, že zpružněná upevnění jsou problematická při použití na tratích s možným výskytem skluzových a dlouhých vln. Naopak upevnění s tužšími podložkami pod patu kolejnice jsou méně vhodná v oblastech s možným výskytem vlnkovitosti. Bližší údaje je možné získat na základě frekvenčních charakteristik funkcí akcelerance jednotlivých upevnění, viz příloha A. Platí, že čím vyšších hodnot dosahují lokální maxima funkce akcelerance, tím výraznější vliv má daná frekvence na dynamiku trati. Z nomogramu na obr. 3-7 pak lze získat, jaké děje v koleji se na daných frekvencích a při známé jízdní rychlosti obvykle projevují. Obecně lze také poznamenat, že každý typ upevnění je vždy nutné podrobit komplexnímu zhodnocení vhodnosti použití při zvážení místních podmínek, jako např. traťové rychlosti, poloměrů směrových oblouků, provozního zatížení apod.

V grafických výstupech měření bylo někdy obtížné rozlišit jednotlivé křivky v oblasti nízkých frekvencí, zejména pak u konstrukcí buzených vibrátorem. Rozlišení frekvenční odezvy funkce resp. amplitudového spektra by bylo možné zlepšit pomocí logaritmického měřítka osy y, čímž by se ovšem vytratil na první pohled viditelný rozdíl mezi maximálními a minimálními hodnotami sledované veličiny. Rezonanční oblasti jsou navíc zřejmé z tabulek útlumu, viz příloha A.

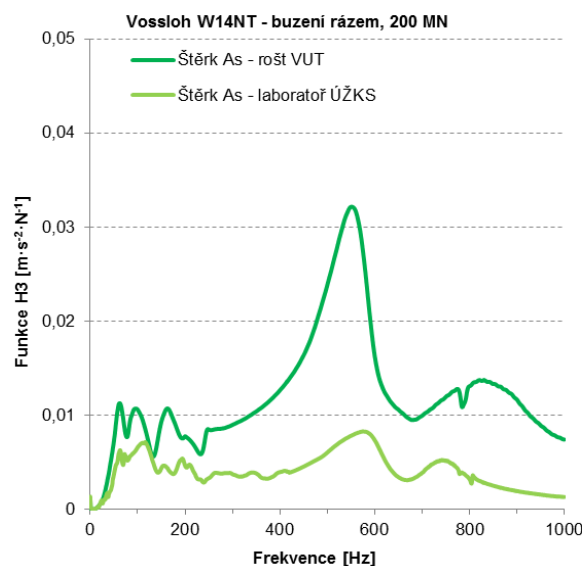
Porovnatelnost mezi měřeními v laboratoři ÚŽKS a měřením ve venkovním areálu Fakulty stavební VUT v Brně byla ověřována prostřednictvím referenčních upevnění W 14NT a W 21NT testovaných v obou uvedených případech. Příklad na konstrukci W 14NT ukazuje, že vlastnosti upevnění jsou do frekvence cca 500 Hz prakticky nezávislé na místě uložení zkušební vzorku, viz obr. 7-10 až obr. 7-12. Nesnadno porovnatelné tak zůstávají pouze vlastnosti kolejového lože. To může být způsobeno nehomogenním prostředím kolejového lože, kterým se budící impuls šíří. Další vliv může mít citlivost uložení měřicího kamene v kolejovém loži a v neposlední řadě také nestejně charakteristiky kolejového lože, přestože byl při jeho zřizování brán zřetel na zachování stejných postupů výstavby.



Obr. 7-10 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W14NT; srovnání měřicích míst; kolejnice; zdroj: autor



Obr. 7-11 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W14NT; srovnání měřicích míst; pražec; zdroj: autor



Obr. 7-12 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W14NT; srovnání měřicích míst; štěrk; zdroj: autor

7.2 Měření in-situ

7.2.1 Lokalita Bílovice nad Svitavou

Dne 21. 4. 2012 byla vůči laboratorním zkouškám uskutečněna doplňková měření in-situ. Pro tyto účely byl vybrán zkušební úsek na trati č. dle knižního jízdního řádu 260 v km 166,140 v lokalitě u Bílovic nad Svitavou. Jedná se o přímý úsek koleje I. tranzitního železničního koridoru. V koleji č. 1 je instalováno upevnění kolejnic W 14 na betonových pražcích B 91S/1. Kolej č. 2 je vystrojena upevněním FC I na betonových pražcích B 91P.

Železniční svršek je v soustavě UIC 60 a ke dni měření byl v původním stavu z roku 1997, kdy proběhla poslední rekonstrukce předmětného úseku. V terénu byla z důvodů pravidelného provozu na trati využita pouze metoda buzení rázovým kladivem. Další informace k metodice jsou popsány v kapitole 4.2.2.3.

7.2.1.1 Frekvenční analýza

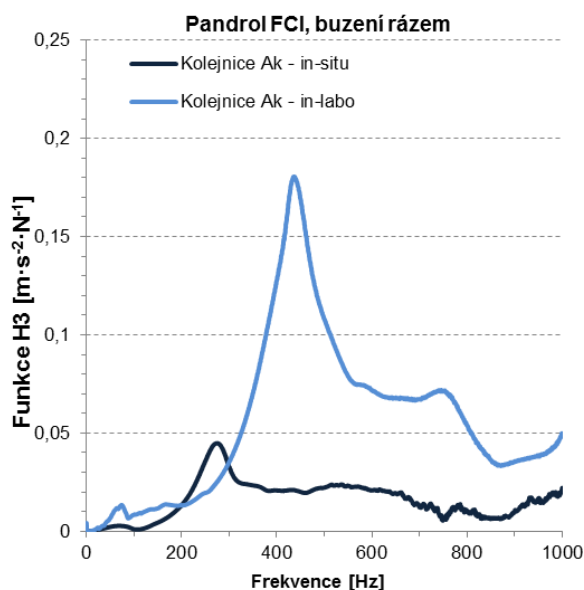
V pásmu nízkých frekvencí jsou stěžejní pro upevnění FC I frekvence 83 Hz na kolejnici a 64 Hz na pražci. Upevnění zde dosahuje útlumu na kolejnici 3,3 %, zatímco na pražci 2,1 %. Pro upevnění Vossloh nebyly v pásmu nízkých frekvencí nalezeny žádné důležité oblasti.

Ve středněfrekvenčním pásmu je u upevnění FC I nalezena frekvence 277 Hz, na které jsou dosaženy útlumy 3,1 % na kolejnici, resp. 4,6 % na pražci. Na pražci pak tuto frekvenci doplňuje ještě kmitočet 147 Hz s poměrným útlumem 7,7 %. Konstrukce W 14 má významnější frekvenci na kolejnici 119 Hz, kde dosahuje útlumu 1,0 % a na pražci 149 Hz s útlumem 6,2 %.

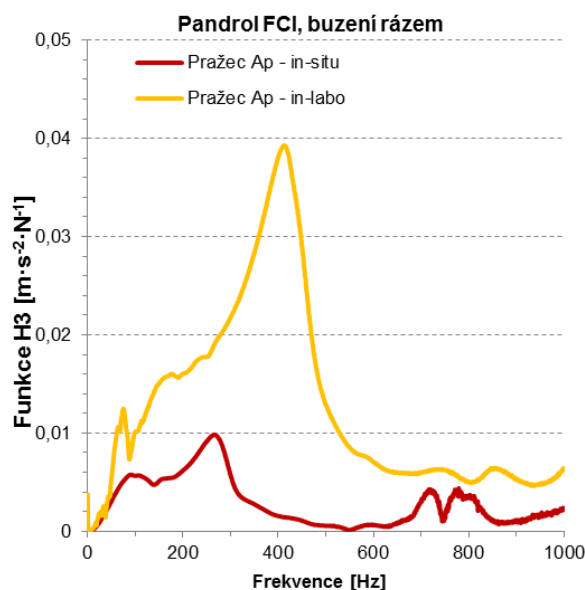
V oblasti vyšších kmitočtů ztrácejí sledovaná upevnění obecně schopnost tlumit zrychlení vibrací. Útlumy zde dosahují průměrných hodnot nepřekračujících na kolejnici 0,5 % u FC I, resp. 1,4 % u W 14. Na pražci jsou pak útlumy obou systémů upevnění takřka nulové. Jako důležité lze u upevnění FC I označit kmitočtové pásmo $510 \div 630$ Hz a frekvenci 775 Hz. U W 14 pak tyto frekvence leží v pásmech $580 \div 650$ Hz a $780 \div 805$ Hz.

7.2.1.2 Shrnutí

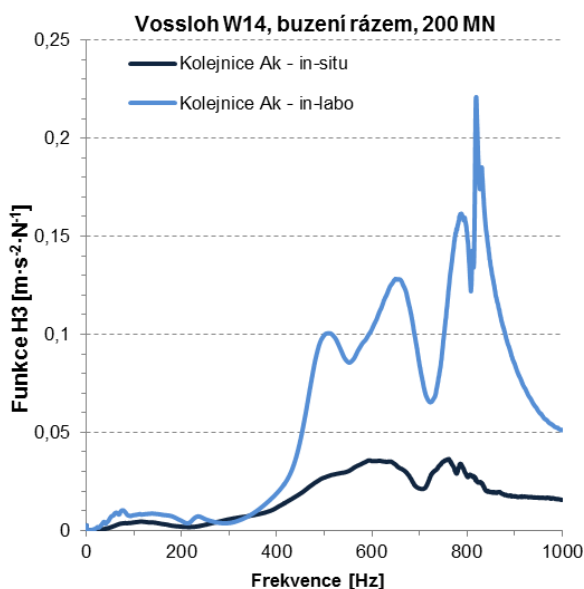
Srovnáním výsledků laboratorních měření s měření v terénu je možné obecně konstatovat, že z měření in-situ je patrný trend snižování významných středních kmitočtových oblastí na kolejnici i na pražci o přibližně $100 \div 150$ Hz směrem k počátku. Toto platí pro obě srovnávaná upevnění FC I i W 14. Měřeními nebyla prokázána příčina tohoto jevu. Souvislosti lze nejpravděpodobněji spatřovat v průběžně podepřené kolejnici a v působení osových sil a napětí v bezстыkové koleji, což nebylo v laboratorních podmínkách zohledněno. Lehce odlišná charakteristika obou zkoumaných upevnění ve vyšších frekvenčních pásmech pak pravděpodobně rovněž souvisí s obecně složitějšími vazbami kolejnice – pražec – kolejové lože in-situ, které nelze v laboratorních podmínkách plně simulovat. Menší amplitudy frekvenčních přenosových funkcí vypovídají o roznášecích schopnostech kolejového roštu a pravděpodobně i o vlivu reálných podmínek uložení, viz obr. 7-13 až obr. 7-16. Podrobné výstupy z měření jsou součástí přílohy B. Je vhodné podotknout, že výsledky byly porovnávány s laboratorními vzorky upevnění s podložkami pod patu kolejnice z roku 2002.



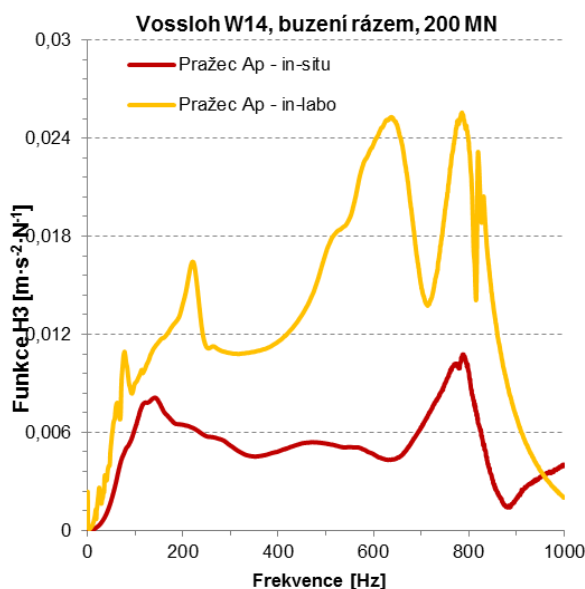
Obr. 7-13 Frekvenční přenosové funkce upevnění Pandrol FCI v závislosti na prostředí; kolejnice; zdroj: autor



Obr. 7-14 Frekvenční přenosové funkce upevnění Pandrol FCI v závislosti na prostředí; pražec; zdroj: autor



Obr. 7-15 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W 14 v závislosti na prostředí; kolejnice; zdroj: autor



Obr. 7-16 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W 14 v závislosti na prostředí; pražec; zdroj: autor

7.2.2 Lokality Počátky-Žirovnice, Popelín a Kamenný Malíkov

Základním cílem měření a analýz bylo sledování způsobu přenosu účinků podélného, příčného a svislého zatížení od železniční dopravy do kolejového lože a dále do konstrukcí železničního spodku a s tím související posuny a vibrace kolejového roštu v úseku dráhy nižšího významu s bezstykovou kolejí. Současně s tím bylo sledováno šíření hluku od železniční dopravy do prostoru podél trati. Pro účely experimentu byl vybrán kolejový rošt

s ocelovými Y pražci s rozevřením 650 mm. Konstrukce železničního svršku s Y pražci, upevněním S 15 a se zúženým tvarem kolejového lože byla následně porovnána s referenčním kolejovým roštem s příčnými betonovými pražci a upevněním KS. Na základě analýzy pak mělo být rozhodnuto o vhodnosti použití Y pražců na regionálních tratích.

Měřicí profily byly situovány v úsecích celostátní trati č. dle knižního jízdního řádu 225 s následujícími parametry:

Lokalita Počátky-Žirovnice

Měřicí stanoviště je situováno ve staničení km 47,000 v přímém úseku koleje. Podélný sklon koleje je -1,41 ‰ (klesá směrem k železniční stanici Počátky-Žirovnice). Od železniční stanice Počátky-Žirovnice do tohoto staničení je trať vedena na betonových pražcích SB 8P a odtud díky přechodové oblasti začíná zkušební úsek s ocelovými Y pražci. Trať je vedena v nízkém asi dvoumetrovém zářezu. Trať je navržena pro traťovou třídu zatížení D4/70. Kolej je 4. řádu a její poslední velká rekonstrukce proběhla v roce 2005.



Obr. 7-17 Měřicí stanoviště v přímém úseku trati, lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

Lokalita Popelín

Měřicí stanoviště s ocelovými pražci tvaru Y leží v pravostranném oblouku v km 45,280 mezi železničními stanicemi Popelín a Počátky-Žirovnice. Směrový oblouk byl projektován jako kružnicový s následujícími parametry:

- $R = 392 \text{ m}$; $V = 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; $I = 48 \text{ mm}$; $n_1 = 9,72\text{V}$; $n_2 = 8,57\text{V}$; $D = 100 \text{ mm}$;
 $lp_1 = 68,05 \text{ m}$; $lp_2 = 60,04 \text{ m}$; $L_i = 131,71 \text{ m}$; kubická parabola.

Trať je zde vedena v zářezu, měřicí profil je vzdálen cca 45 m od železničního přejezdu silnice III. třídy a přibližně 10 m od trubního propustku. Trať sklonově stoupá +11,10 ‰ ve směru na železniční stanici Počátky-Žirovnice. Kolejový rošt s ocelovými pražci Y byl vložen v roce 2005, kdy zájmový úsek prošel kompletní rekonstrukcí. Trať je navržena pro traťovou třídu zatížení D4/70. Z hlediska provozního přepočteného zatížení pak hovoříme o koleji 4. řádu.



Obr. 7-18 Měřicí stanoviště v oblouku s ocelovými pražci Y, lokalita Popelín; zdroj: autor

Lokalita Kamenný Malíkov

Měřicí stanoviště s betonovými pražci SB 8P leží rovněž v pravostranném oblouku v km 38,120 mezi zastávkou Bednárec a výhybnou Kamenný Malíkov. Kružnicový oblouk má tyto parametry:

- $R = 399 \text{ m}$; $V = 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; $I = 60 \text{ mm}$; $n_1 = 9,41\text{V}$; $n_2 = 6,38\text{V}$; $D = 85 \text{ mm}$;
 $lp_1 = 56,00 \text{ m}$; $lp_2 = 38,00 \text{ m}$; $L_i = 360,19 \text{ m}$; kubická parabola.

Trat' je zde vedena ve srovnatelném zářezu a vzdálenost měřicího stanoviště od nejbližší umělé stavby, tj. železničního přejezdu silnice II. třídy, je více než 300 m. Také v tomto případě trat' stoupá, a sice $+12,18 \text{ ‰}$ ve směru na železniční stanici Počátky-Žirovnice. Kolejový rošt s betonovými pražci SB 8P byl vložen v roce 2006 v rámci rekonstrukce daného úseku trati. Také tento úsek je navržen pro traťovou třídu zatížení D4/70 a z hlediska provozního přepočteného zatížení se jedná o kolej 4. řádu.



Obr. 7-19 Měřicí stanoviště v oblouku s betonovými pražci SB 8P, lokalita Kamenný Malíkov; zdroj: autor

V rámci lokality Počátky-Žirovnice proběhla následující měření:

- měření ze dne 2. 9. 2009;
- měření ze dne 3. 7. 2012.

Meteorologické podmínky, které panovaly během prvního měřicího dne v lokalitě Počátky-Žirovnice, jsou uvedeny v tab. 7-2, z druhého měření pak v tab. 7-4. Hodnocená projetá zátěž je přehledně uvedena v tab. 7-3, resp. v tab. 7-5.

Na základě předchozích zkušeností byl v prvním kroku proveden širší výběr vhodných vozidel, srovnatelných na základě jízdní rychlosti, příp. vyvolaného nedostatku převýšení ve směrovém oblouku a na základě vybraných technických parametrů. Mezi tyto parametry patří uspořádání náprav, nápravové zatížení a očekávaný technický stav a stáří vozidla. Před vlastní analýzou byly dále vyhotoveny softwarové výstupy dynamicko-akustických parametrů všech měřených souprav. Na jejich základě byl pak dokončen výběr konkrétních vozidel k dalšímu zpracování. Odstraněny byly všechny vzorky, jejichž parametry nebyly dostatečně reprezentativní pro konkrétní kategorii vlaků. Z hlediska členění se pak jedná o vlaky vyšší kvality SC, EC, IC, Ex, rychlíky R, osobní vlaky Os, motorové osobní vlaky MOs, nákladní vlaky N a jiné speciální vlaky. V tabulkách projeté zátěže jsou uvedeny pouze takto vybrané vlaky. Na nich byla dále prováděna podrobná analýza a jsou rovněž předmětem grafických výstupů přílohy C. Ostatní kolejová doprava byla pouze zohledněna v rámci obecných závěrů a tezí. Obdobný postup byl aplikován také v ostatních měřicích kampaních.

Při měření ze dne 2. 9. 2009 byly v koleji na betonovém pražci osazeny snímače s kanálovým označením S0, S1, S2, S3, S7, A0, A1, A2, A4, A5, A6, A13 a současně s tím na Y pražci snímače S0, S1, S2, S3, S5, S7, S10, A0, A1, A2, A4, A5, A6, A11, A13, A14, A16, viz kapitola 4.2. V rámci měření ze dne 3. 7. 2012 byly současně v měřicích profilech na betonovém i ocelovém pražci shodně instalovány snímače A6, A17, A18, M0, M1. Poloha mikrofону M1 byla oproti metodice upravena na 6,0 m od osy koleje. Důvodem jsou nepříznivé terénní podmínky v lokalitách Popelín a Kamenný Malíkov, kde je trať vedena hlubokým zářezem a osazení mikrofону do normové vzdálenosti 7,5 m od osy koleje bylo nemožné. V rámci zachování porovnatelnosti dat získaných měřeními v přímé a v oblouku byla pak tato zmenšená vzdálenost zachována i v lokalitě Počátky-Žirovnice.

Datum	Čas	Počasí	Teplota vzduchu [°C]	Teplota kolejnice [°C]		Vlhkost vzduchu [%]	Atm. tlak [hPa]	Max. vítr [m·s ⁻¹]
				Vnitřní	Vnější			
2. 9. 2009	11:00	polojasno	22,0	20,6	20,6	-	-	-
	15:50	polojasno	26,5	30,5	31,2	-	-	-

Tab. 7-2 Meteorologické podmínky v den měření 2. 9. 2009, lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

Počátky-Žirovnice; 2. 9. 2009							
Pořadí	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr	Rychlost [km·h ⁻¹]	Pozn.
1	10:56	Os	210	2	Jindřichův Hradec	70	1)
2	11:24	-	MVTV 2-035	1	Počátky-Žirovnice	33	1)
3	11:40	R	242	6	Počátky-Žirovnice	62	1)
4	12:08	-	MVTV 2-035	1	Jindřichův Hradec	30	1)
5	12:09	-	MVTV 2-035	1	Jindřichův Hradec	20	1)
6	12:09	-	MVTV 2-035	1	Počátky-Žirovnice	30	1)
7	12:13	-	MVTV 2-035	1	Jindřichův Hradec	40	1)
8	12:15	-	MVTV 2-035	1	Počátky-Žirovnice	20	1)
9	12:17	-	MVTV 2-035	1	Jindřichův Hradec	40	1)
10	12:38	R	242	6	Jindřichův Hradec	65	-
11	13:41	MOs	809	-	Jindřichův Hradec	72	-
12	13:46	-	MVTV 2-035	1	Jindřichův Hradec	59	-
13	14:29	-	MVTV 2-035	1	Jindřichův Hradec	50	-
14	14:30	-	MVTV 2-035	1	Počátky-Žirovnice	22	-
15	15:21	-	MVTV 2-035	1	Jindřichův Hradec	50	-
16	15:42	R	242	6	Počátky-Žirovnice	70	-
17	15:48	-	MVTV 2-035	1	Jindřichův Hradec	50	-
18	15:53	-	MVTV 2-035	1	Jindřichův Hradec	42	-
19	16:08	N	230	17	Počátky-Žirovnice	70 ÷ 65	-

Tab. 7-3 Projeté hodnocená zátěž v den měření 2. 9. 2009, lokalita Počátky-Žirovnice;
zdroj: autor

Datum	Čas	Počasí	Teplota vzduchu [°C]	Teplota kolejnice [°C]		Vlhkost vzduchu [%]	Atm. tlak [hPa]	Max. vítr [m·s ⁻¹]
				Vnitřní	Vnější			
3. 7. 2012	9:30	zataženo	24,3	20,5	20,7	60	978	1,4
	10:30		28,1	23,9	23,2	54	976	4,0
	11:30		35,0	31,5	33,9	44	975	0,9
	12:30		34,1	26,8	27,1	45	976	4,2
	13:30		33,5	30,0	28,9	58	976	2,0

Tab. 7-4 Meteorologické podmínky v den měření 3. 7. 2012, lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

Počátky-Žirovnice; 3. 7. 2012							
Pořadí	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr	Rychlost [km·h ⁻¹]	Pozn.
1	10:07	R	242	5	Počátky-Žirovnice	70	-
2	10:45	R	242	6	Jindřichův Hradec	65	-
3	11:08	MOs	914	1	Jindřichův Hradec	66	-
4	11:26	N	230	24	Jindřichův Hradec	67	-
5	11:46	R	242	5	Počátky-Žirovnice	65	-
6	13:07	Os	210	3	Jindřichův Hradec	60	-

Tab. 7-5 Projetá hodnocená zátěž v den měření 3. 7. 2012, lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

V rámci lokality Popelín proběhla následující měření:

- měření ze dne 3. 9. 2009;
- měření ze dne 27. 6. 2012.

Meteorologické podmínky z prvního měřicího dne v lokalitě Popelín jsou uvedeny v tab. 7-6, z druhého pak v tab. 7-8. Hodnocená projetá zátěž je přehledně uvedena v tab. 7-7, resp. v tab. 7-9. V rámci měření ze dne 3. 9. 2009 byly v koleji na Y pražci osazeny snímače s kanálovým označením S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, A0, A1, A2, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A11, A12, A13, A14, A15, A16. V rámci měření ze dne 27. 6. 2012 byly instalovány snímače A6, A13, A17, A18, A19, A20, M0, M1, M2, M3. Polohy mikrofónů M1 a M3 byly oproti metodice upraveny na 6,0 m od osy koleje.

Datum	Čas	Počasí	Teplota vzduchu [°C]	Teplota kolejnice [°C]		Vlhkost vzduchu [%]	Atm. tlak [hPa]	Max. vítr [m·s ⁻¹]
				Vnitřní	Vnější			
3. 9. 2009	11:00	polojasno	23,2	22,6	22,3	-	-	-
	14:00	polojasno	26,8	33,9	32,5	-	-	-

Tab. 7-6 Meteorologické podmínky v den měření 3. 9. 2009, lokalita Popelín; zdroj: autor

Popelín; 3. 9. 2009							
Pořadí	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr	Rychlost [km·h ⁻¹]	Pozn.
1	10:51	R	242	6	Jindřichův Hradec	68	-
2	11:04	Os	210	2	Jindřichův Hradec	53	-
3	11:37	R	242	6	Počátky-Žirovnice	63	-
4	12:02	MOs	810	-	Počátky-Žirovnice	70	-
5	12:33	R	242	6	Jindřichův Hradec	73	-
6	13:21	N	240+240	25	Jindřichův Hradec	30	-

Tab. 7-7 Projetá hodnocená zátěž v den měření 3. 9. 2009, lokalita Popelín; zdroj: autor

Datum	Čas	Počasí	Teplota vzduchu [°C]	Teplota kolejnice [°C]		Vlhkost vzduchu [%]	Atm. tlak [hPa]	Max. vítr [m·s ⁻¹]
				Vnitřní	Vnější			
27. 6. 2012	10:40	jasno	23,7	33,9	34,7	30	978	4,0
	11:40		23,5	39,9	41,1	36	982	3,5
	12:40	jasno až polojasno	24,0	43,5	42,8	35	986	3,9
	13:40		27,1	44,7	41,1	27	985	2,8
	14:40		26,0	46,5	39,0	29	985	3,9
	15:40	polojasno	25,0	27,0	26,0	31	983	3,6

Tab. 7-8 Meteorologické podmínky v den měření 27. 6. 2012, lokalita Popelín; zdroj: autor

Popelín; 27. 6. 2012							
Pořadí	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr	Rychlost [km·h ⁻¹]	Pozn.
1	10:42	N	240	19	Jindřichův Hradec	40 ÷ 29	-
2	10:50	MOs	914+814	-	Počátky-Žirovnice	67	-
3	11:39	R	242	5	Počátky-Žirovnice	69	-
4	12:23	R	242	5	Jindřichův Hradec	74	-
5	12:45	Os	210	3	Počátky-Žirovnice	54	-
6	14:29	R	242	5	Jindřichův Hradec	69	-

Tab. 7-9 Projeté hodnocená zátěž v den měření 27. 6. 2012, lokalita Popelín; zdroj: autor

V rámci lokality Kamenný Malíkov proběhla následující měření:

- měření ze dne 25. 8. 2010;
- měření ze dne 28. 6. 2012.

Meteorologické podmínky z prvního měřicího dne v lokalitě Kamenný Malíkov jsou uvedeny v tab. 7-10, z druhého pak v tab. 7-12. Hodnocená projeté zátěž je přehledně uvedena v tab. 7-11, resp. v tab. 7-13. V rámci měření ze dne 25. 8. 2010 byly v koleji na betonovém pražci osazeny snímače s kanálovým označením S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, A0, A1, A2, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A11, A12, A13. V rámci měření ze dne 28. 6. 2012 byly instalovány snímače A6, A13, A17, A18, A19, A20, M0, M1, M2, M3. Polohy mikrofónů M1 a M3 byly oproti metodice upraveny na 6,0 m od osy koleje.

Datum	Čas	Počasí	Teplota vzduchu [°C]	Teplota kolejnice [°C]		Vlhkost vzduchu [%]	Atm. tlak [hPa]	Max. vítr [m·s ⁻¹]
				Vnitřní	Vnější			
25. 8. 2010	10:30	polojasno	23,2	24,6	22,5	-	-	-
	15:30	polojasno	25,8	30,1	30,5	-	-	-

Tab. 7-10 Meteorologické podmínky v den měření 25. 8. 2010, lokalita Kamenný Malíkov;
zdroj: autor

Kamenný Malíkov; 25. 8. 2010							
Pořadí	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr	Rychlost [km·h ⁻¹]	Pozn.
1	11:40	R	242	5	Počátky-Žirovnice	65	-
2	12:16	N	240+240	25	Jindřichův Hradec	54	-
3	13:16	Os	210	2	Jindřichův Hradec	56	-
4	13:34	R	242	4	Počátky-Žirovnice	71	-
5	14:27	R	242	5	Jindřichův Hradec	60	-
6	14:40	MOs	814+914	-	Počátky-Žirovnice	68	-

*Tab. 7-11 Projetá hodnocená zátěž v den měření 25. 8. 2010, lokalita Kamenný Malíkov;
zdroj: autor*

Datum	Čas	Počasí	Teplota vzduchu [°C]	Teplota kolejnice [°C]		Vlhkost vzduchu [%]	Atm. tlak [hPa]	Max. vítr [m·s ⁻¹]
				Vnitřní	Vnější			
28. 6. 2012	10:00	Oblačno	25,3	31,0	26,1	45	983	2,0
	11:00	Polojasno až oblačno	25,2	35,4	33,4	47	985	2,7
	12:00	Polojasno	26,0	37,3	38,3	42	984	3,9
	13:00		27,4	42,5	37,4	40	984	2,0
	14:00		27,7	45,4	41,0	43	984	1,7
	10:00	Oblačno	25,3	31,0	26,1	45	983	2,0

*Tab. 7-12 Meteorologické podmínky v den měření 28. 6. 2012, lokalita Kamenný Malíkov;
zdroj: autor*

Kamenný Malíkov; 28. 6. 2012							
Pořadí	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr	Rychlost [km·h ⁻¹]	Pozn.
1	10:05	R	242	5	Počátky-Žirovnice	70	-
2	11:34	R	242	5	Počátky-Žirovnice	69	-
3	12:26	N	240	19	Jindřichův Hradec	61	-
4	12:45	R	242	5	Jindřichův Hradec	64	-
5	13:17	Os	210	3	Jindřichův Hradec	60	-
6	14:41	MOs	914+814	-	Počátky-Žirovnice	67	-

*Tab. 7-13 Projetá hodnocená zátěž v den měření 28. 6. 2012, lokalita Kamenný Malíkov;
zdroj: autor*

K práci s naměřenými signály byl použit software měřicí ústředny DeweSoft, program FlexPro 7.0, Microsoft Excel 2010 a program VibroDiagRail, který byl pro tyto účely vyvinut na ÚŽKS VUT v Brně.

7.2.2.1 Časová analýza

7.2.2.1.1 Časová analýza posunů

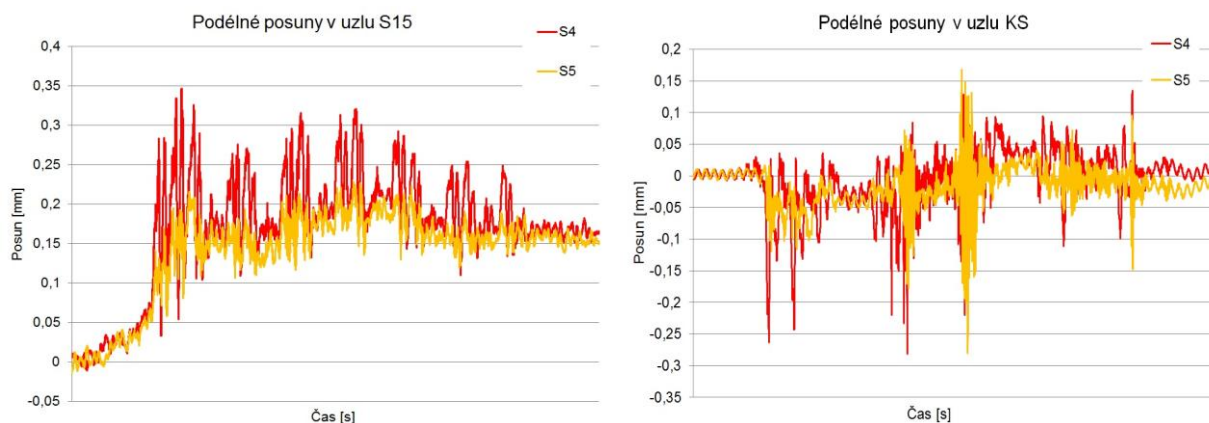
Pro jednoznačné určení chování kolejového roštu bylo nezbytné stanovit znaménkovou konvenci. Konvence je pro všechna měření zvolena následujícím způsobem:

- minus (-): pohyb kolejnice nebo pražce podélně proti vlaku, příčně dovnitř oblouku příp. vpravo ve směru staničení v přímé, resp. svisle směrem dolů (pokles);
- plus (+): pohyb kolejnice nebo pražce podélně ve směru vlaku, příčně vně oblouku příp. vlevo ve směru staničení v přímé, resp. svisle směrem nahoru (zdvih).

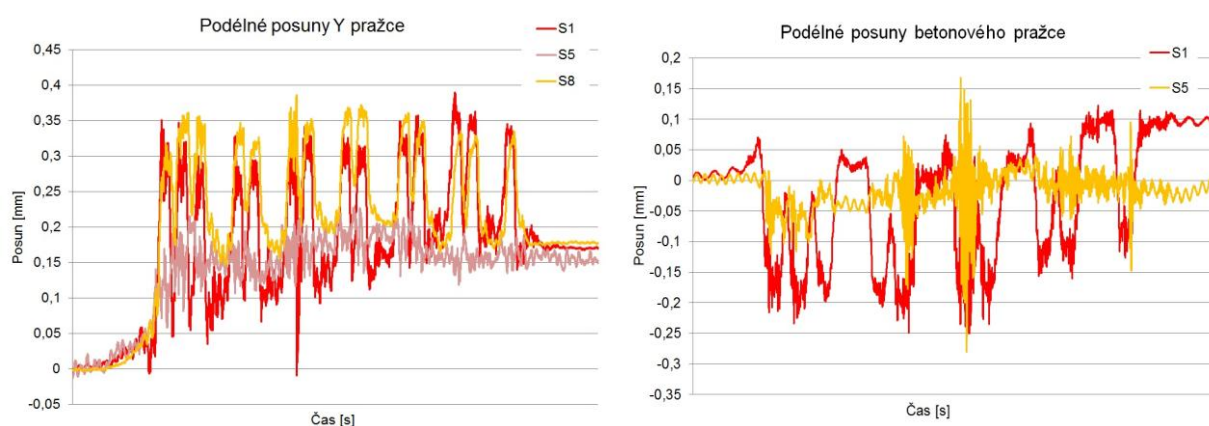
V rámci časové analýzy byly zjištěny následující posuny:

- podélné posuny u upevnění S 15 -0,4 mm až 0,9 mm na kolejnici, resp. -0,3 mm až 0,8 mm na pražci, přičemž mediány na kolejnici jsou -0,2 mm a 0,4 mm a na pražci -0,1 mm a 0,3 mm;
- podélné posuny u upevnění KS -0,7 mm až 0,6 mm na kolejnici, resp. -0,5 mm až 0,5 mm na pražci, přičemž mediány na kolejnici jsou -0,2 mm a 0,2 mm a na pražci -0,1 mm a 0,1 mm;
- příčné posuny Y pražce -0,3 mm až 0,8 mm s mediány -0,1 mm a 0,4 mm;
- příčné posuny pražce SB 8P -0,4 mm až 0,4 mm s mediány -0,1 mm a 0,2 mm;
- svislé posuny Y pražce -2,9 mm až 0,7 mm s mediány -2,1 mm a 0,3 mm.
- svislé posuny pražce SB 8P -1,8 mm až 0,4 mm s mediány -0,6 mm a 0,1 mm.

V případě podélných posunů lze vypožorovat, že posuny kolejnice jsou vždy výraznější, než posuny pražce, viz obr. 7-20. Tento fakt vypovídá o pružně deformačních vlastnostech použitých typů upevnění. V posunech působících proti směru jízdy vlaku vychází lépe kolejový rošt s Y pražci. Ve směru jízdy vlaků vykazuje srovnání posunů opačný charakter, lépe vychází betonové pražce. Tato skutečnost by mohla poukazovat na větší hmotnost betonových pražců a s ní související vyšší setrvačnou sílu konstrukce. Z chování pražce Y lze vysledovat tendenci, jakoby se vždy nechal strhnout průjezdem soupravy. Posuny ve směru jízdy vlaku jsou bez rozdílu vyšší než posuny proti. Betonové pražce vykazují opačné chování, jako kdyby byly postupně „nasávány“ blížící se soupravou, a to i směrem stoupání trati! U testovaných vzorků není patrné, že by převýšená či nepřevýšená strana koleje byla více namáhána podélnými silami, byť se časové průběhy na jednotlivých stranách pražce navzájem liší, viz příklad na obr. 7-21.

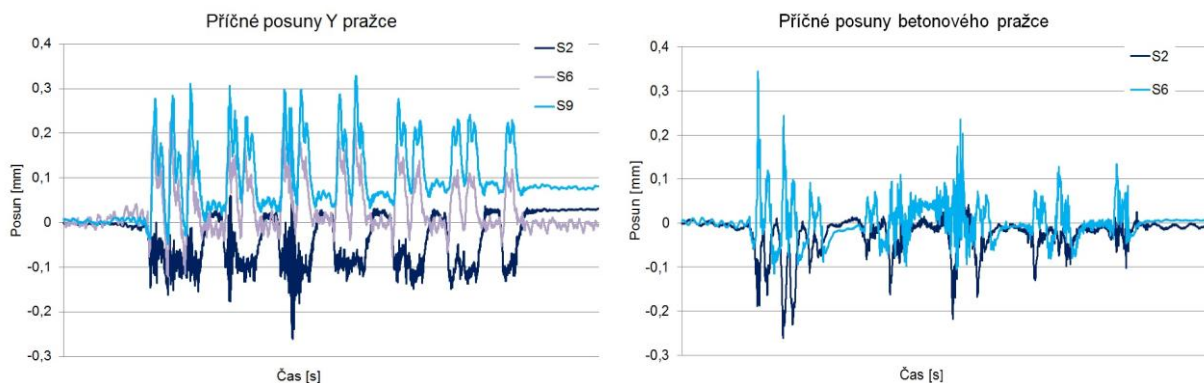


Obr. 7-20 Vlevo podélné posuny v uzlu S 15, vlak č. 5 (viz tab. 7-7), lokalita Popelín; Vpravo podélné posuny v uzlu KS, vlak č. 4 (viz tab. 7-11), lokalita Kamenný Malíkov; zdroj: autor



Obr. 7-21 Vlevo podélné posuny Y pražce, vlak č. 5 (viz tab. 7-7), lokalita Popelín; Vpravo podélné posuny pražce SB 8P, vlak č. 4 (viz tab. 7-11), lokalita Kamenný Malíkov; zdroj: autor

Z pohledu příčného namáhání jsou obě konstrukce pražců srovnatelné. Z obr. 7-22 je patrný větší silový účinek a tedy větší příčný posun, vždy pod vodícím dvojkolím jednotlivých vozů měřené rychlíkové soupravy. S přihlédnutím k hodnotám globálních extrémů je dále patrné, že zatímco nepřevýšená část pražců se pohybuje směrem do oblouku, převýšená část pražců vně oblouk. To by mohlo souviset s vypoulením úložné plochy pražce, způsobeným ohybem pražce přes jeho středovou část. Takový případ nastává obvykle v koleji za provozu, kdy pražec v kolejovém loži přestává být podepřen pouze v části svojí délky v místech pod kolejnicovými pásy, jak je tomu dle teoretických předpokladů v období krátce po podbití. Dochází k podepření pražce v celé délce ložné plochy a s ní související změně působení vnitřních sil v pražci. Postupem času dochází vlivem působení nápravových tlaků ke ztrátě ostrohrannosti a následné redistribuci zrn kolejového lože v oblastech počátečního podepření pražců. Neméně zajímavým poznatkem vyplývajícím z analýzy posunů jsou vyšší příčné pohyby vzdálenějšího ramene rozevřené části Y pražce z hlediska směru jízdy vlaků. Tato skutečnost napovídá o určitém kroucení pražce v horizontální rovině.

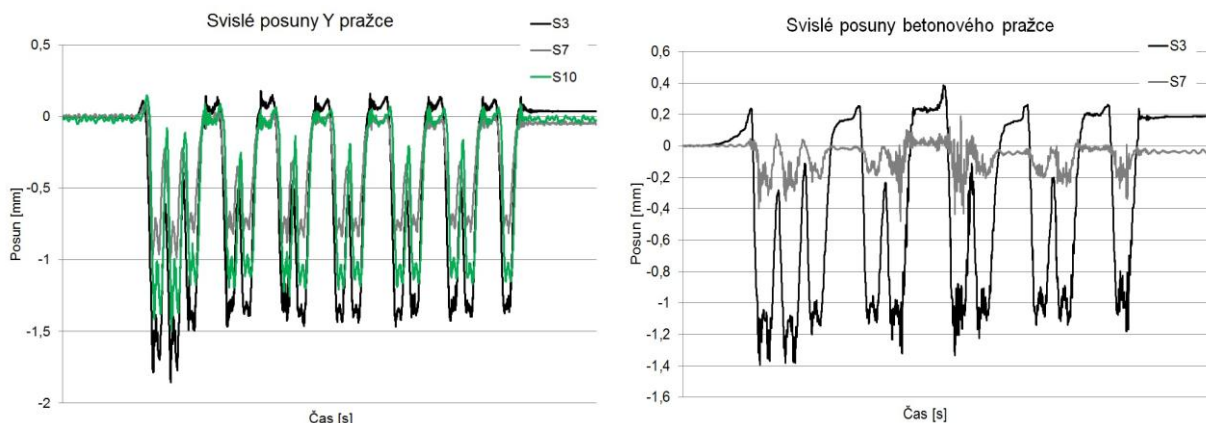


Obr. 7-22 Vlevo příčné posuny Y pražce, vlak č. 5 (viz tab. 7-7), lokalita Popelín; Vpravo příčné posuny pražce SB 8P, vlak č. 4 (viz tab. 7-11), lokalita Kamenný Malíkov; zdroj: autor

Z globálních extrémů je zřejmé, že největších výchylek dosahuje kolejový rošt srovnávaných konstrukcí ve svislém směru. Y pražec v tomto ohledu vykazuje horší vlastnosti. Maximální poklesy pražce Y lze vidět na hlavě nerozšířené části pražce (bod 1). Pohybují se v rozmezí $1,4 \div 2,9$ mm. Na rozevřené straně pražce vycházejí svislé poklesy v oblouku mnohdy až poloviční, v přímé pak zpravidla o 10 % až 20 % menší. Na rozevřené straně pražce byly větší poklesy vždy zaznamenány v bodě 3, tedy v místě ve směru klesání trati. Směr jízdy měřené soupravy nemá na toto zjištění žádný vliv. Pravděpodobně tedy daný jev souvisí s tíhovým zatížením kolejového roštu. Zdvihy Y pražce jsou podobné na všech ramenech. U betonového pražce SB 8P lze maximální poklesy v oblouku zaznamenat bez výjimky na hlavě pražce na nepřevýšené straně koleje (bod 1). Tyto jsou v intervalu $1,4 \div 1,8$ mm. Na převýšené straně (bod 2) jsou pak poklesy přibližně třetinové. Obdobné zjištění lze aplikovat také pro zdvihy pražce. Zdvihy se pohybují v rozmezí $0,1 \div 0,4$ mm. V přímém úseku trati vycházejí zdvihy i poklesy na obou hlavách pražce srovnatelné. V porovnání s nepřevýšenou částí v koleji v oblouku jsou pak hodnoty zdvihů cca o 30 % nižší, průměrné hodnoty za oba konce pražce jsou však srovnatelné. Poklesy však v přímé vycházejí třetinové v porovnání s nepřevýšenou částí oblouku. Také v průměru za oba konce pražce se jedná o přibližně poloviční hodnoty. U ocelového pražce jsou přitom tyto charakteristiky právě opačné. Z pohledu zdvihů a poklesů pražce vychází lépe úsek v oblouku. Na tuto skutečnost budou mít vliv individuální podmínky podepření pražců.

V rámci dřívějších analýz [94] byla ověřována závislost velikosti svislých pohybů Y pražce na působící svislé kolové síle Q . Kolová síla byla zjišťována vždy na vnějším kolejnicovém páse. Posuny se měřily v rámci jednoho pražce, ale i na pěti různých pražcích zaráz. V prvním případě byly osazeny oba hlavní nosníky Y pražce, a to na nerozevřeném i na rozevřených koncích pražce a v jeho středové části. V druhém případě byly měřeny pouze hlavy pražce za vnějším kolejnicovým pásem. Velikost svislého zatlačení hlavy pražce se pohybovala od 1,4 mm do 3,4 mm, což prakticky koresponduje s mými výsledky. Znovu bylo ověřeno, že ve středové části pražce dochází jen k minimálním poklesům. Díky jejich známé velikosti pak bylo možné spočítat prohnutí pražce, které se pohybovalo v rozmezí od 1,6 mm do 2,7 mm. Z výsledků měření poklesů jednotlivých hlav pražců je patrné, že vzájemný poměr velikosti poklesů pod jednotlivými dvojkolími vozidel je výrazně menší, než vzájemný

poměr velikosti Q sil těchto dvojkolí. To platí především při srovnání lokomotiv a vozů jednotlivých vlaků.



Obr. 7-23 Vlevo svislé posuny Y pražce, vlak č. 5 (viz tab. 7-7), lokalita Popelín; Vpravo svislé posuny pražce SB 8P, vlak č. 4 (viz tab. 7-11), lokalita Kamenný Malíkov; zdroj: autor

Vzhledem ke skutečnosti, že byl k dispozici motorový pracovní vůz MVTV 2-035, bylo na místě rozhodnuto použít pro měření také tzv. metody Stop & Go [95]. Vůz nejdříve při první jízdě z obou směrů pomalu popojížděl a nad měřicím stanovištěm přibrzdil. Při druhé jízdě ve směru na Jindřichův Hradec vždy nad stanoveným měřicím místem zastavil po dobu 20 vteřin, proběhlo měření a následně na pokyn po zaregistrování údajů do měřicí ústředny se posunul na další měřicí stanoviště. Nejdříve zastavil první nápravou na desátém betonovém pražci před měřeným betonovým pražcem, poté přešel nad hlavu pátého pražce před měřeným betonovým pražcem, třetí zastavení bylo již na měřeném pražci a další měření na desátém pražci za měřeným betonovým pražcem. U měřeného ocelového Y pražce to vypadalo obdobně. Byly měřeny i posuny způsobené stáním zadní nápravy. Metoda Stop & Go je známá z jiných druhů měření (např. GPS). Tímto měřením bylo sledováno posouzení odlišností mezi „statickým“ a dynamickým zatížením, neboť právě při metodě Stop & Go bylo využito převážně „statické“ kolové síly přenášené z nápravy MVTV do kolejového roštu a železničního svršku. (Pozn.: statické zatížení je označeno v uvozovkách, jako pseudostatické, protože se nejednalo o úplně klidové statické zatížení, neboť na dvojkolí bylo i při stání vozidla částečně přenášeno chvění z chodu motoru MVTV).

Záznamy svislých posunů z jednotlivých snímačů jsou pro přehlednost kumulovány do časové osy x délky 523 vteřin s vertikálními posuny v mm představujícími osu y, viz obr. 7-24. Červeně jsou označeny svislé posuny na betonovém pražci a modře svislé posuny na ocelovém Y pražci.

Průběh zkoušky metodou Stop & Go je patrný z tab. 7-14. Z výsledků měření se dá odvozovat, že při nízkých jízdních rychlostech vlaků řádově do $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, je vliv dynamického přetížení na posuny pražců minimální. Z provedených měření vertikálních a horizontálních posunů se dají odvodit vektory prostorového posunu bodů v čase a jejich trendy. Metody Stop & Go popisuje chování kolejového roštu zpomaleně v čase. Ze začátku se na měřeném pražci projevuje zatížení jen nepatrně. Teprve s postupným přibližováním vlaku k měřenému pražci dochází k mírnému nadzvedání a následnému poklesu při přejezdu

kola. Po přesunu kola dále ve směru jízdy dojde opět k jistému přizvednutí pražce. Při pohybu vozidla se účinky od dalších náprav projevují analogicky, což svědčí o dobré pružnosti kolejové jízdní dráhy. Zejména ocelový pražec se projevuje jako velmi pružný v porovnání s betonovým.

Vyhodnocení svislých posunů Stop & Go

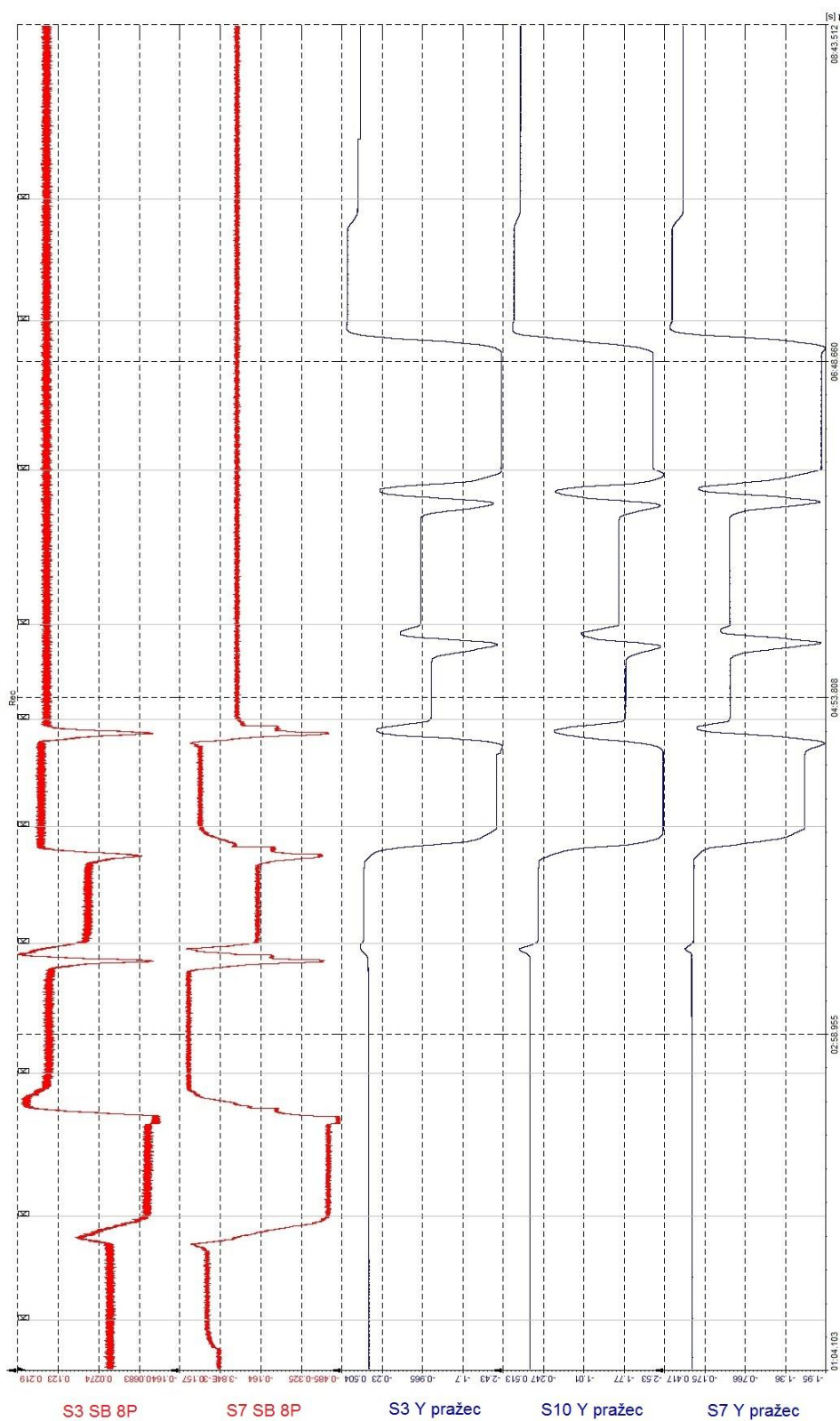
Časová osa - Popis akce		Svislé posuny				
		Betonový pražec		Ocelový Y-pražec		
		S3	S7	S3	S7	S10
Stání na pražci první nápravou						
64 - 80	Pomalá jízda směr Popelín					
80 - 108	Stání pražec č. 0	0.01	0.23			
108 - 124	Přejezd					
124 - 148	Stání pražec č. 1	0.04	0.50			
148 - 172	Přejezd					
172 - 196	Stání pražec č. 2	-0.08	-0.44			
196 - 220	Přejezd					
220 - 244	Stání pražec č. 3	0.15	0.13			
244 - 256	Přejezd					
256 - 279	Stání pražec č. 4	0.05	-0.16	0.09	-0.02	-0.16
279 - 293	Přejezd					
293 - 314	Stání pražec č. 5	0.17	0.09	-2.32	-1.64	-2.51
314 - 337	Přejezd					
337 - 354	Stání pražec č. 6			-1.13	-0.55	-1.80
354 - 388	Přejezd					
388 - 414	Stání pražec č. 7			-0.94	-0.55	-1.68
414 - 426	Přejezd					
Stání na pražci poslední nápravou						
426 - 450	Stání pražec č. 8			-2.41	-1.89	-2.32
450 - 472	Přejezd					
472 - 492	Stání pražec č. 9			0.39	0.30	0.29
492 - 499	Přejezd					
499 - 520	Stání pražec č. 10			0.20	0.14	0.17
520 - 523	Odjezd směr Popelín					

Pozn: Pražec číslo 2 je měřený betonový pražec
Pražec číslo 5 a číslo 8 je měřený ocelový pražec

Počet pražců od vztažného betonového pražce číslo 0

Betonový pražec číslo 1	+ 5
Betonový pražec číslo 2	+ 10
Betonový pražec číslo 3	+ 20
Betonový pražec číslo 4	+ 29
Ocelový Y-pražec číslo 5	+ 34
Ocelový Y-pražec číslo 6	+ 39
Ocelový Y-pražec číslo 7	+ 44
Ocelový Y-pražec číslo 8	+ 34
Ocelový Y-pražec číslo 9	+ 39
Ocelový Y-pražec číslo 10	+ 44

Tab. 7-14 Průběh zkoušky svislých posunů metodou Stop & Go na betonovém pražci SB 8P a na ocelovém pražci tvaru Y, lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor



Obr. 7-24 Záznam svislých posunů z metody Stop & Go na betonovém pražci SB 8P a na ocelovém pražci tvaru Y, lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

7.2.2.1.2 Časová analýza zrychlení vibrací

Základním údajem pro časovou analýzu zrychlení vibrací je jeho efektivní hodnota RMS [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]. RMS uvedené v tabulkách níže byly určeny z časového intervalu stanoveného dle kap. 4.2.5.5. Pro signály čidel umístěných mimo kolejový rošt byly vzhledem k malým hodnotám zrychlení stanoveny hladiny zrychlení vibrací L_{aef} [dB]. Hladiny zrychlení pak byly kvůli srovnání doplněny také k ostatním signálům na kolejovém roštu a v jednotlivých tabulkách jsou uvedeny v kulatých závorkách. V tab. 7-15 a tab. 7-16 jsou u každého kanálu uvedeny v horním řádku hodnoty z ocelového Y pražce a v dolním řádku z betonového pražce SB 8P.

Ze srovnání obou konstrukčních typů upevnění lze konstatovat dvojnásobně až trojnásobně větší zrychlení příčných a svislých vibrací na kolejnici upevněné k betonovému pražci. Podélná zrychlení vibrací na kolejnici v oblouku plus zrychlení působící ve všech třech sledovaných směrech na pražci však vycházejí pro kolejový rošt s betonovými pražci výrazně lépe. Jsou mnohdy až pětinasobně nižší než zrychlení na ocelovém pražci Y. Uvedené skutečnosti poukazují na výrazně horší tlumící schopnosti uzlu upevnění S 15 použitého na Y pražci, což je dobře patrné ze srovnání RMS na kolejnici a na pražci ve stejném měřicím bodě. Z hlediska šíření vibrací pražcovým podložím lze hodnotit testované konstrukce jako srovnatelné. V přímém úseku trati vycházejí výhodněji pražce ocelové, zatímco v úseku v oblouku zase pražce betonové. Uvedené je způsobeno pravděpodobně specifickými vlastnostmi pražcového podloží ve vybraných lokalitách. Přesto se více přikláním k výsledkům z přímého úseku, kde bylo u testovaných konstrukcí zajištěno totožné dopravní zatížení. Měřicí profily jsou navíc umístěny blízko u sebe. Lze tedy spíše očekávat srovnatelnější vlastnosti podloží, než v případě vzdálených stanovišť v obloucích, jež se navíc nacházela v hlubokých zářezech.

Na základě hodnot RMS z kolejového roštu je patrné, že u Y pražce umístěného v koleji v oblouku dochází k očekávanému rozložení hmoty na rozevřené straně na přibližně dvě stejné poloviny. Rozevřená část pražce se pro tento případ nachází na převýšené straně koleje. V přímém úseku trati však toto zjištění tak jednoznačné není. Ve svislém směru je dosaženo na všech třech koncích pražce přibližně stejných hodnot RMS. Uvedené pravděpodobně souvisí s tíhovým rozložením sil jedoucího vlaku. Z lokalit v oblouku je dále patrné, že hodnoty RMS jsou vyšší na vnitřní straně oblouku. Tato skutečnost je lépe vidět na výstupech z bližší vzdálenosti, tedy na kolejovém roštu a na hraně šterkového lože. Pro představu, např. na hlavě pražce jsou hodnoty na vnitřní straně oblouku vyšší v průměru o 5 dB (betonové pražce), resp. o 10 dB (ocelové pražce).

Na velikost efektivních hodnot zrychlení vibrací má menší vliv narůstající rychlost při konstantním zatížení, než zvyšující se zatížení při srovnatelných rychlostech. Při stejné rychlosti byla u rychlíkových a nákladních souprav hodnota zrychlení vibrací mnohonásobně vyšší, než u vlaků osobních a MVTV 2-035.

Nejvýrazněji působí vibrace ve svislém směru. Vibrace podélné a svislé mají obdobný charakter bez ohledu na přímý úsek trati nebo trať v oblouku. Příčné vibrace v přímé koleji se svým charakterem od zbylých dvou směrů mírně odlišují. To je pravděpodobně způsobeno

původcem jejich vzniku, neboť jsou způsobeny z velké části translačním pohybem dvojkolí vykonávajícího sinusový pohyb. V ostatních případech je hlavním původcem vibrací rotační pohyb dvojkolí po nedokonalé hladké jízdní ploše.

Přestože měření na kolejovém roštu a měření v pražcovém podloží probíhala v nestejném datu a tedy na odlišných vozidlech, dle výstupů na hlavě pražce lze usoudit, že měření je možné považovat za srovnatelná. Výhodou úseku v přímé je simultánní měření odezvy stejného vozidla na obou testovaných konstrukcích. Výsledky z přímé tedy nejsou ovlivněny různorodostí provozované dopravy, jak tomu může být v úsecích v oblouku.

Měřicí bod		Upevnění S 15 / KS, efektivní hodnoty RMS [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] ([dB]), lokalita Počátky-Žirovnice					
		MOs 13:41 $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	Os 10:56 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	R 15:42 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	N 16:08 $70 \div 65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	R 12:38 $65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	R 11:40 $62 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
Bod 1	A0	3 (130)	10 (140)	13 (142)	14 (143)	9 (139)	8 (138)
		10 (140)	21 (146)	30 (150)	43 (153)	26 (148)	19 (146)
	A4	9 (139)	23 (147)	26 (148)	35 (151)	12 (142)	11 (141)
		1 (120)	2 (126)	3 (130)	3 (130)	2 (126)	2 (126)
	A1	5 (134)	13 (142)	17 (145)	19 (146)	12 (142)	20 (146)
		7 (137)	18 (145)	22 (147)	28 (149)	18 (145)	16 (144)
	A5	4 (132)	9 (139)	11 (141)	15 (144)	21 (146)	21 (146)
		2 (126)	3 (130)	4 (132)	6 (136)	3 (130)	3 (130)
	A2	5 (134)	19 (146)	17 (145)	19 (146)	9 (139)	9 (139)
		13 (142)	26 (148)	36 (151)	52 (154)	29 (149)	26 (148)
	A6	10 (140)	18 (145)	23 (147)	44 (153)	22 (147)	21 (146)
		2 (126)	3 (130)	4 (132)	7 (137)	4 (132)	5 (134)
Bod 2	A11	4 (132)	-	12 (142)	18 (145)	12 (142)	-
		-	-	-	-	-	-
	A13	8 (138)	18 (145)	13 (142)	40 (152)	22 (147)	21 (146)
		2 (126)	4 (132)	5 (134)	8 (138)	5 (134)	6 (136)
Bod 3	A14	4 (132)	-	11 (141)	19 (146)	12 (142)	11 (141)
		-	-	-	-	-	-
	A16	5 (134)	12 (142)	13 (142)	25 (148)	14 (143)	20 (146)
		-	-	-	-	-	-

Tab. 7-15 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS; upevnění S 15 (horní řádek), upevnění KS (spodní řádek); lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

Měřicí bod		Upevnění S 15 / KS, efektivní hodnoty RMS [dB], lokalita Počátky-Žirovnice					
		R 10:07 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	N 11:26 $67 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	MOs 11:08 $66 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	R 10:45 $65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	R 11:46 $65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	Os 13:07 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
A6	oc.	143	149	139	144	143	139
	bet.	131	137	127	130	111	128

Tab. 7-16 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS; upevnění S 15 (horní řádek), upevnění KS (spodní řádek); lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

Měřicí bod		Upevnění S 15 / KS, efektivní hodnoty RMS [dB], lokalita Počátky-Žirovnice					
		R 10:07 70 km·h ⁻¹	N 11:26 67 km·h ⁻¹	MOs 11:08 66 km·h ⁻¹	R 10:45 65 km·h ⁻¹	R 11:46 65 km·h ⁻¹	Os 13:07 60 km·h ⁻¹
A17	oc.	99	105	93	99	100	98
	bet.	101	103	103	100	101	100
A18	oc.	77	81	70	77	77	75
	bet.	85	85	96	84	83	81

Tab. 7-16 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS; upevnění S 15 (horní řádek), upevnění KS (spodní řádek); lokalita Počátky-Žirovnice (pokračování); zdroj: autor

Měřicí bod		Upevnění S 15, efektivní hodnoty RMS [m·s ⁻²] ([dB]), lokalita Popelín					
		R 12:33 73 km·h ⁻¹	MOs 12:02 70 km·h ⁻¹	R 10:51 68 km·h ⁻¹	R 11:37 63 km·h ⁻¹	Os 11:04 53 km·h ⁻¹	N 13:21 30 km·h ⁻¹
Bod 1	A0	47 (153)	70 (157)	36 (151)	34 (151)	27 (149)	14 (143)
	A4	53 (154)	72 (157)	55 (155)	16 (144)	15 (144)	6 (136)
	A1	31 (150)	45 (153)	22 (147)	25 (148)	22 (147)	10 (140)
	A5	27 (149)	47 (153)	30 (150)	8 (138)	7 (137)	2 (126)
	A2	63 (156)	101 (160)	46 (153)	44 (153)	35 (151)	15 (144)
	A6	47 (153)	62 (156)	46 (153)	31 (150)	24 (148)	8 (138)
Bod 2	A7	20 (146)	23 (147)	16 (144)	11 (141)	20 (146)	5 (134)
	A11	19 (146)	24 (148)	26 (148)	16 (144)	18 (145)	5 (134)
	A8	22 (147)	25 (148)	18 (145)	12 (142)	21 (146)	7 (137)
	A12	8 (138)	10 (140)	14 (143)	11 (141)	6 (136)	2 (126)
	A9	34 (151)	37 (151)	30 (150)	19 (146)	29 (149)	9 (139)
	A13	18 (145)	21 (146)	38 (152)	15 (144)	15 (144)	5 (134)
Bod 3	A14	16 (144)	18 (145)	13 (142)	9 (139)	15 (144)	4 (132)
	A15	11 (141)	14 (143)	9 (139)	6 (136)	9 (139)	3 (130)
	A16	28 (149)	34 (151)	27 (149)	15 (144)	23 (147)	6 (136)

Tab. 7-17 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS; upevnění S 15; lokalita Popelín; zdroj: autor

Měřicí bod		Upevnění S 15, efektivní hodnoty RMS [dB], lokalita Popelín					
		R 12:23 74 km·h ⁻¹	R 11:39 69 km·h ⁻¹	R 14:29 69 km·h ⁻¹	MOs 10:50 67 km·h ⁻¹	Os 12:45 54 km·h ⁻¹	N 10:42 40 ÷ 29 km·h ⁻¹
A6		151	150	151	151	145	146
A17		103	103	103	96	103	103
A18		86	86	87	82	89	91
A13		140	140	143	139	140	143
A19		100	99	101	95	100	101
A20		84	84	85	78	86	88

Tab. 7-18 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS; upevnění S 15; lokalita Popelín; zdroj: autor

Měřicí bod		Upevnění KS, efektivní hodnoty RMS [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] ([dB]), lokalita Kam. Malíkov					
		R 13:34 71 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	MOs 14:40 68 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 11:40 65 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 14:27 60 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	Os 13:16 56 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	N 12:16 54 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
Bod 1	A0	30 (150)	66 (156)	20 (146)	23 (147)	20 (146)	25 (148)
	A4	7 (137)	12 (142)	5 (134)	5 (134)	4 (132)	6 (136)
	A1	43 (153)	71 (157)	30 (150)	28 (149)	24 (148)	29 (149)
	A5	7 (137)	11 (141)	5 (134)	5 (134)	5 (134)	6 (136)
	A2	77 (158)	151 (164)	56 (155)	162 (164)	38 (152)	86 (159)
	A6	10 (140)	11 (141)	7 (137)	8 (138)	6 (136)	12 (142)
Bod 2	A7	15 (144)	20 (146)	8 (138)	8 (138)	17 (145)	9 (139)
	A11	6 (136)	7 (137)	3 (130)	3 (130)	5 (134)	3 (130)
	A8	30 (150)	39 (152)	15 (144)	16 (144)	29 (149)	20 (146)
	A12	7 (137)	11 (141)	4 (132)	5 (134)	5 (134)	5 (134)
	A9	137 (163)	62 (156)	89 (159)	27 (149)	47 (153)	27 (149)
	A13	9 (139)	9 (139)	4 (132)	4 (132)	5 (134)	8 (138)

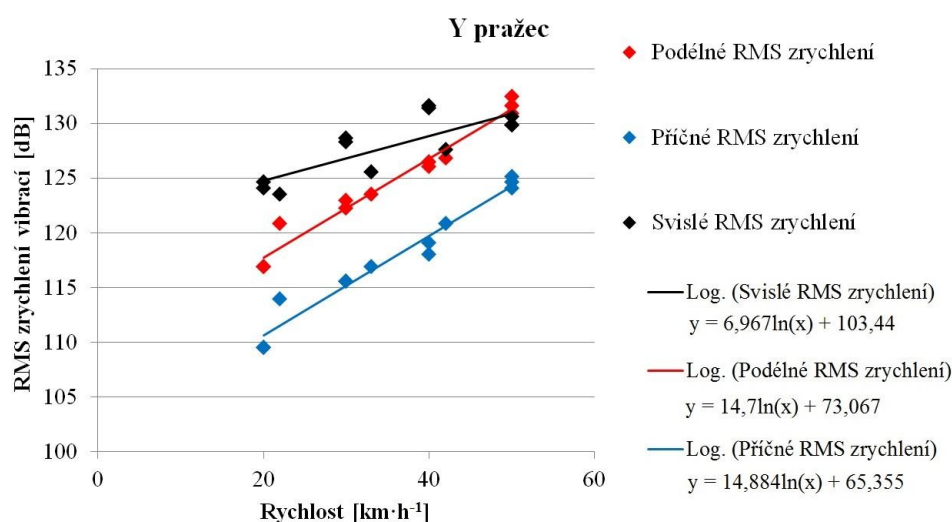
Tab. 7-19 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS; upevnění KS; lokalita Kamenný Malíkov;
zdroj: autor

Měřicí bod	Upevnění KS, efektivní hodnoty RMS [dB], lokalita Kamenný Malíkov					
	R 10:05 70 km·h ⁻¹	R 11:34 69 km·h ⁻¹	MOs 14:41 67 km·h ⁻¹	R 12:45 64 km·h ⁻¹	N 12:26 61 km·h ⁻¹	Os 13:17 60 km·h ⁻¹
A6	136	136	132	134	137	134
A17	100	100	93	100	104	100
A18	84	84	75	82	85	82
A13	130	130	126	129	133	129
A19	94	93	86	93	95	93
A20	78	78	71	78	83	78

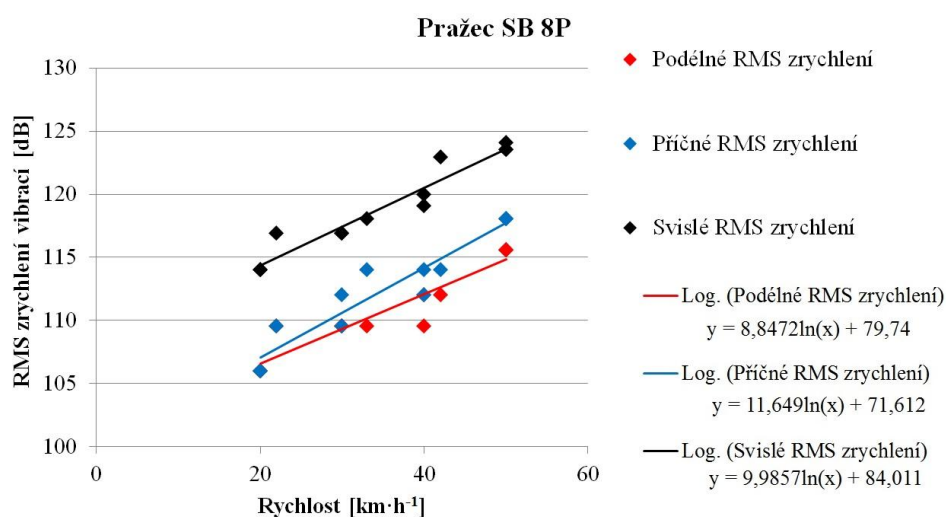
Tab. 7-20 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS; upevnění KS; lokalita Kamenný Malíkov;
zdroj: autor

Aby bylo možné stanovit vliv velikosti dynamických účinků na jízdní rychlosti, bylo potřeba, aby se měřicím úsekem pohybovalo stále stejné vozidlo variabilními rychlostmi. K tomu posloužil pracovní vůz MVTV 2-035 s připojeným dvounápravovým vozem. Jedná se o stejnou soupravu, jež byla využita při měření metodou Stop & Go, viz výše. Vlak měřicím stanovištěm projel vždy čtyřikrát rychlostmi od 20 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ do 50 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ v kroku po 10 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$. Celkem tak bylo zaznamenáno 16 průjezdů vozidla, které byly realizovány v mezerách mezi běžným provozem. Tab. 7-21 zobrazuje vybraná data z měření. Z efektivních hodnot zrychlení vibrací je patrné, že s rostoucí rychlostí vozidla rostou rovněž dynamické účinky na trať. Tento nárůst je patrný na všech měřených kanálech a nemá v intervalu rychlostí lineární, nýbrž logaritmický charakter. Pro ukázkou uvedu, že zatímco se se změnou rychlosti z 20 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ na 30 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ zvýšily průměrné efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS ve svislém směru na ocelovém pražci o 0,9 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, tak při rychlostním skoku ze 40 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ na 50 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ to bylo už o 1,4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Použitím logaritmické regrese bylo ve všech měřených bodech a směrech dosaženo velmi vysoké úrovně spolehlivosti R^2 v hodnotách 0,71 až 0,95.

Nárůst účinků je nejlépe vidět na obr. 7-25 a obr. 7-26, kde jsou rovněž uvedeny odhady regresních rovnic. Podotýkám, že tyto odhady jsou platné pouze pro dané terénní a konstrukční podmínky, dané zatížení a uvedený rychlostní interval. Na toto vstupní měření měl navázat projekt SŽDC „Verifikace prostředků pro měření GPK“ č. S 23733/2015-SŽDC-O8, kde by měření závislosti rychlosti na velikosti dynamických účinků bylo statisticky zpřesněno a byl rozšířen interval rychlostí i měřených kolejových vozidel. V projektu se počítalo s využitím infrastruktury obou železničních okruhů zkušebního centra Výzkumného ústavu železničního, a.s. v Cerhenicích. Termín plnění projektu byl z původních plánů v roce 2014 přesunut na září 2015 až listopad 2016. Nakonec se však projekt nepodařilo spustit ani v tomto posunutém termínu.



Obr. 7-25 Vliv rychlosti na velikost efektivní hodnoty RMS zrychlení vibrací; upevnění S 15; lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor



Obr. 7-26 Vliv rychlosti na velikost efektivní hodnoty RMS zrychlení vibrací; upevnění KS; lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

Měřicí bod		Upevnění S 15 / KS, efektivní hodnoty RMS [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]											
		Rychlost průjezdu MVTV 2-035 [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]											
		20	20	22	30	30	33	40	40	42	50	50	50
Bod 1	A0	0,5	0,4	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,2	1,4	2,0	2,2	2,0
		0,6	0,8	1,2	1,2	1,3	1,3	1,7	1,8	2,1	3,6	3,6	3,3
	A4	0,7	0,7	1,1	1,3	1,4	1,5	2,0	2,1	2,2	3,8	4,2	3,5
		0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6
	A1	0,8	0,7	1,2	1,2	1,4	1,5	1,8	1,9	2,2	3,0	3,3	3,1
		1,2	1,4	2,1	2,3	2,4	2,4	3,3	3,3	3,8	5,2	5,6	5,1
	A5	0,3	0,3	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,6	1,8	1,7
		0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8
	A2	1,4	1,4	1,2	2,2	2,4	2,7	3,2	3,4	2,2	3,0	3,3	3,1
		1,2	1,3	2,1	2,2	2,4	2,5	3,4	3,6	4,1	6,8	7,3	6,5
Bod 2	A11	1,7	1,6	2,4	2,6	2,7	3,3	3,7	3,8	4,3	6,2	6,6	6,4
		0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,4	1,5	1,6	1,5
	A13	-	-	0,6	-	-	-	-	-	1,5	2,5	2,5	2,4
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bod 3	A14	1,2	1,3	1,7	2,1	2,0	2,2	3,2	3,3	3,6	5,1	5,2	5,2
		0,6	0,6	0,8	0,8	0,9	0,9	1,2	1,2	1,1	1,6	1,8	1,6
	A16	0,5	0,5	0,7	0,9	0,9	-	1,6	1,7	1,7	2,8	2,7	2,5
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 7-21 Vliv rychlosti na velikost efektivní hodnoty RMS zrychlení vibrací; upevnění S 15 (horní řádek), upevnění KS (spodní řádek); lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

7.2.2.1.3 Časová analýza akustického tlaku

Důležitým deskriptorem časové analýzy akustických parametrů trati je bezesporu hladina expozice průjezdu TEL [dB]. Hodnoty TEL byly získány z upravených signálů dle kap. 4.2.5.5 přepočtem na základě vztahu (5-27). Hladiny hluku jsou upraveny váhovým filtrem A. Bylo tak učiněno z důvodu ověření vlivu testovaných konstrukcí s ohledem na životní prostředí, zejména pak s ohledem na negativní účinky na člověka. Jelikož byly z již známých důvodů mikrofony M1 a příp. M3 přesunuty z obvyklých 7,5 m od osy koleje do vzdálenosti 6,0 m od osy koleje, byla normová vzdálenost dopočítána dle vztahu pro výpočet útlumu hluku vzdáleností ve venkovním prostoru:

$$L_{pi+1} = L_{pi} + K \cdot \log\left(\frac{r_i}{r_{i+1}}\right) + K_{odr}, \quad (7-1)$$

kde L_{pi+1} [dB] je hledaná hladina hluku ve vzdálenosti r_{i+1} [m], L_{pi} [dB] je známá hladina hluku ve vzdálenosti r_i [m], K je konstanta útlumu [-] a K_{odr} je koeficient respektující odrazivost okolních ploch [-].

Níže uvedené tabulky indikují několik skutečností. U úseků vedoucích obloukem je zřejmé, že vyšší naměřené hodnoty hladin hluku se vyskytují na vnitřní straně směrem ke středu oblouku. Tato skutečnost se týká obou zkoumaných konstrukcí železničního roštu. Další očekávanou skutečností je, že hlučnost je ovlivněna rychlostí pojezdu, hmotností soupravy a jejím technickým stavem a typem lokomotivy. Srovnáme-li však akustické parametry od stejných vlakových souprav jedoucích podobnou rychlostí (rozdíl do cca $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) po obou zkoumaných konstrukcích železničního svršku, tak je zřejmé, že zásadní rozdíly v hlučnosti nejsou.

Zajímavé chování lze vypočítat u soupravy MOs RegioNova při průjezdu obloukem. Vozidlo dosahuje u obou srovnávaných konstrukcí jednoznačně nejvyšších hladin expozice průjezdu, přestože jízdní rychlosti ani nápravové zatížení soupravy nejsou nejvyšší. Tuto skutečnost lze přisuzovat pravděpodobně konstrukci vlaku, který je tak pro současné četné užívání na regionálních tratích v silně zastavěném území nevhodná. Nárůst hladiny TEL ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje vzhledem k ostatním měřeným vlakům srovnatelné rychlosti lze vyčíslit středními hodnotami 3 dB(A) až 5dB(A), v extrémních případech až 7 dB(A).

Měřicí bod		Upevnění S 15 / KS, hladiny expozice průjezdu TEL [dB(A)], lokalita Počátky-Žirovnice					
		R 10:07 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	N 11:26 $67 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	MOs 11:08 $66 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	R 10:45 $65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	R 11:46 $65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	Os 13:07 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
M0	oc.	97	100	95	97	97	93
	bet	97	100	95	96	96	93
M1 1)	oc.	89	91	85	87	89	84
	bet	89	92	86	88	88	85
M1 _{7,5} 1)	oc.	88	90	84	86	88	83
	bet	88	91	85	87	87	84

Pozn.: 1) poloha mikrofону M1 byla odchýlně od metodiky měření 6,0 m od osy koleje, hodnoty ve vzdálenosti 7,5 m (M1_{7,5}) byly získány přepočtem

Tab. 7-22 Hladiny expozice průjezdu TEL; upevnění S 15 (horní řádek), upevnění KS (spodní řádek); lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

Měřicí bod		Upevnění S 15, hladiny expozice průjezdu TEL [dB(A)], lokalita Popelín				
		R 12:23 $74 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	R 11:39 $69 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	R 14:29 $69 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	MOs 10:50 $67 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	Os 12:45 $54 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
M0		100	99	100	104	95
M1 1)		93	92	93	96	87
M1 _{7,5} 1)		92	91	93	95	86

Pozn.: 1) poloha mikrofону M1 a M3 byla odchýlně od metodiky měření 6,0 m od osy koleje, hodnoty ve vzdálenosti 7,5 m (M1_{7,5}, M3_{7,5}) byly získány přepočtem

Tab. 7-23 Hladiny expozice průjezdu TEL; upevnění S 15; lokalita Popelín; zdroj: autor

Měřicí bod	Upevnění S 15, hladiny expozice průjezdu TEL [dB(A)], lokalita Popelín					
	R 12:23 74 km·h ⁻¹	R 11:39 69 km·h ⁻¹	R 14:29 69 km·h ⁻¹	MOs 10:50 67 km·h ⁻¹	Os 12:45 54 km·h ⁻¹	N 10:42 40 ÷ 29 km·h ⁻¹
M2	98	97	98	100	94	94
M3 1)	90	90	90	91	86	86
M3 _{7,5} 1)	89	89	89	90	85	85

Pozn.: 1) poloha mikrofону M1 a M3 byla odchýlně od metodiky měření 6,0 m od osy koleje, hodnoty ve vzdálenosti 7,5 m (M1_{7,5}, M3_{7,5}) byly získány přepočtem

Tab. 7-23 Hladiny expozice průjezdu TEL; upevnění S 15; lokalita Popelín (pokračování); zdroj: autor

Měřicí bod	Upevnění KS, hladiny expozice průjezdu TEL [dB(A)], lokalita Kamenný Malíkov					
	R 10:05 70 km·h ⁻¹	R 11:34 69 km·h ⁻¹	MOs 14:41 67 km·h ⁻¹	R 12:45 64 km·h ⁻¹	N 12:26 61 km·h ⁻¹	Os 13:17 60 km·h ⁻¹
M0	100	100	104	101	99	98
M1 1)	91	91	95	91	90	89
M1 _{7,5} 1)	90	90	94	90	89	88
M2	98	98	101	99	99	97
M3 1)	89	90	92	90	90	89
M3 _{7,5} 1)	88	89	91	89	89	88

Pozn.: 1) poloha mikrofonu M1 a M3 byla odchýlně od metodiky měření 6,0 m od osy koleje, hodnoty ve vzdálenosti 7,5 m (M1_{7,5}, M3_{7,5}) byly získány přepočtem

Tab. 7-24 Hladiny expozice průjezdu TEL; upevnění KS; lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

7.2.2.2 Frekvenční analýza

7.2.2.2.1 Frekvenční analýza zrychlení vibrací

V rámci frekvenční analýzy byly vyhotoveny grafy uvedené v příloze C. První sloupec grafů představuje časový průběh zrychlení vibrací, druhý pak amplitudové spektrum zrychlení vibrací získané rychlou Fourierovou transformací časové řady. Základní analýza byla prováděna ve třech frekvenčních oblastech v souladu s kapitolou 7.1.2. Grafy amplitudových spekter z prvního měření ze dne 2. 9. 2009 mají rozšířenou frekvenční osu až k hodnotám 2,0 kHz. Analýza zde však prokázala, že v pásmu 1,0 kHz až 2,0 kHz se nevyskytují z hlediska dynamiky trati žádné zásadní oblasti. Při dalších měřeních byla proto tato oblast vyjmuta, čímž se dosáhlo příznivějšího rozlišení frekvenční osy.

Z časových průběhů zrychlení vibrací je možné identifikovat jednotlivé podvozky vozů, příp. nápravy hnacích vozidel a to ve všech měřených směrech, nejlépe pak ve svislém na patě kolejnice a pro upevnění S 15. V těchto místech jsou vibrace vyvolané účinky dynamického zatížení logicky největší. Na kolejnici ocelového pražce dosahují nejčastěji hodnot do 150 m·s⁻² v podélném a příčném směru a do 200 m·s⁻² ve svislém směru. Pro kolejnici

betonového pražce jsou tyto extrémy ještě vyšší, $200 \div 250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ pro podélný a příčný směr a až $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ pro směr svislý. Na hlavě ocelového pražce lze pak očekávat zrychlení $100 \div 250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a ve svislém směru až $400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, zatímco na betonovém pražci hodnoty přibližně o řád nižší. Na hraně kolejového lože a ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje pak extrémy nepřesahují hodnoty v řádu desetin resp. setin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Výsledky tak prakticky potvrzují zjištění z kapitoly 7.2.2.1.2. Nezahrnuji do nich nestandardnosti typu plochého kola apod. Tyto jevy způsobují nárůst lokálních extrémů na hodnoty vyšší, než jsou zde uvedené.

V nízkofrekvenční oblasti je úroveň podélných a příčných vibrací velice nízká. Na kolejnici nelze v poměru ke středním a vyšším frekvencím nalézt žádné významné hodnoty. Také na pražci je situace velmi podobná. Pouze v případě některých lokomotiv s nápravovými tlaky nad 20 t (vybrané rychlíky a nákladní vlaky) lze považovat za důležité frekvence $60 \div 80 \text{ Hz}$. Ani v tomto případě se však z globálního pohledu nejedná o dominantní hodnoty. Velikosti amplitudového spektra jsou na ocelovém pražci v řádu jedné desetiny $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ a na betonovém pražci pak dokonce jen v řádech setin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Svislý směr je více patrný jak na kolejnici v případě ocelového pražce, tak i na obou srovnávaných typech pražců a to pro většinu měřených vozidel. Ani zde však hodnoty amplitud nepřekračují řády desetin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, přičemž na ocelovém pražci jsou tyto hodnoty méně příznivé, než na pražci betonovém. V kolejovém loži je úroveň svislých vibrací u obou srovnávaných konstrukcí podobná. Pohybuje se řádově v setinách $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Srovnatelné jsou rovněž vibrace ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje. Zde jsou amplitudová spektra již v řádech tisícín $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Nízkofrekvenční pásmo je v případě posledně dvou jmenovaných pozic nejvíce dominantní z celého měřeného signálu.

Středněfrekvenční oblast 80 Hz až 400 Hz se vyznačuje vyššími hodnotami amplitudového spektra na kolejnici a v převážné většině případů i na pražci, než tomu bylo v případě nízkých frekvencí. Podélné vibrace vykazují významné frekvence v pásmu $350 \div 400 \text{ Hz}$ u upevnění S 15 a kolem hraniční frekvence 400 Hz u upevnění KS. Úroveň vibrací na kolejnici dosahuje u obou upevnění řádově desetin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Betonový pražec v tomto ohledu vychází méně příznivě, přesto jsou maximální hodnoty amplitudového spektra o velikosti do $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. U ocelového pražce lze mluvit o přibližně polovičních hodnotách. Podélné vibrace jsou naopak vyšší na patě ocelového pražce. Zde nejvyšší hodnoty amplitudového spektra vykazuje nákladní vlak, tj. cca $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Na betonovém pražci lze v průměru zjistit přibližně o řád nižší hodnoty, přesto i zde dokázal nákladní vlak vybudit zrychlení až $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Příčná zrychlení vibrací jsou na kolejnici srovnatelná pro oba typy upevnění a pohybují se řádově opět v desetinách $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Z hlediska kmitočtů se jedná o pásmo $350 \div 400 \text{ Hz}$ u upevnění S 15, resp. o pásmo $300 \div 400 \text{ Hz}$ u upevnění KS. Nejvyšší hodnoty amplitudového spektra se pohybují kolem $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a jejich příčinou jsou opět účinky nákladních vlaků. V případě ocelového pražce se navíc jedná o nejvíce dominantní pásmo z celého měřeného spektra v přímém úseku trati. Na pražci je pak situace příznivější pro upevnění KS. Upevnění KS dosahuje polovičních amplitudových spekter, než upevnění S 15, přičemž lze řádově hovořit o úrovni v rozmezí prvních dvou desetin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, kdy nejhorší jsou opět hodnoty u nákladních vlaků. V kolejovém roštu je nejzásadnější svislý směr působení vibrací. Středněfrekvenční pásmo je navíc nejdominantnější z celého spektra na kolejnici i na pražci u upevnění S 15 v úseku v přímé (v měřicím úseku v oblouku je pásmo největších

amplitud posunuto k vyšším frekvencím kolem 600 Hz), resp. pouze na pražci v případě upevnění KS, tentokrát však jak v přímé, tak i v oblouku. Významné oblasti jsou totožné s podélnými vibracemi, tj. 350 ÷ 400 Hz u upevnění S 15 a 400 Hz u upevnění KS. Hodnoty na kolejnici jsou mírně nepříznivější u betonového pražce, přičemž maximální amplitudová spektra lze vypočítávat u nákladních vlaků a pohybují se kolem $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Na pražci vycházejí až trojnásobně větší amplitudová spektra pro upevnění S 15. Maximální hodnoty se zde pohybují kolem $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ a jsou vyvolané opět průjezdy nákladních vlaků. V kolejovém loži a ve šterku lze v přímém úseku trati zmínit frekvence do 100 Hz, zatímco v úseku oblouku frekvence až do 200 Hz. Amplitudová spektra dosahují v této oblasti hodnot 50 % až 100 % úrovně zjištěné pro frekvence 60 ÷ 80 Hz. Je vhodné podotknout, že výše uvedené skutečnosti platí zejména pro úseky v přímé, není-li uvedeno jinak. Obecně lze poznamenat, že na nepřevýšené straně oblouku je nutné uvedené hodnoty násobit 1,2 až 1,3.

V oblasti vyšších vibrací 400 ÷ 1000 Hz se vyskytují nejvýznamnější amplitudová spektra pro řadu čidel. Tato skutečnost je nejlépe patrná v podélném směru na kolejnici i na pražci obou testovaných upevnění. V případě ocelového pražce se jedná o široká frekvenční pásma 550 ÷ 750 Hz, resp. 850 ÷ 1000 Hz. Úroveň zrychlení vibrací je zde nejčastěji $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ na kolejnici a až $1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ na pražci. Velmi dominantní v porovnání s nízkofrekvenčním, resp. středněfrekvenčním pásmem, jsou pro betonový pražec oblasti 850 ÷ 1000 Hz (kolejnice) a 600 Hz (pražec). Amplitudová spektra zde dosahují až pětinasobných hodnot v porovnání s ostatními frekvencemi. Na pražci, zejména pak v přímém úseku trati, se jedná o velmi úzkou a specifickou oblast, která je nepochybně spjata s dynamickými vlastnostmi kolejového roštu s pražci SB 8P. Úroveň zrychlení vibrací na kolejnici dosahuje hodnot až $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, zatímco na pražci $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Také pro příčný směr je pásmo vyšších frekvencí stěžejní. Výjimku tvoří jen signály z kolejnice v přímém úseku trati, kde nejvyšších hodnot bylo dosaženo již ve středněfrekvenčním pásmu. Pro upevnění S 15 jsou zajímavá opět frekvenční pásma 550 ÷ 750 Hz, resp. 850 ÷ 1000 Hz. Amplitudová spektra zde dosahují zrychlení až $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ společně pro kolejnici i pražec. Amplitudová spektra jsou přesto rozdílná, kdy nižší pásmo z kolejnice je na pražci utlumené. Upevnění KS vykazuje nejvyšší amplitudy v pásmech 550 ÷ 750 Hz, resp. 850 ÷ 1000 Hz (kolejnice) a 850 Hz (pražec). Na kolejnici je úroveň zrychlení až $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, zatímco na pražci jsou hodnoty přibližně třetinové až poloviční. Také zde je oblast na pražci velmi úzká a ve srovnání se zbývajících frekvencemi i velmi výrazná, obdobně jako u podélných vibrací. Zatímco v nízkofrekvenční a středněfrekvenční oblasti byl svislý směr působení vibrací jednoznačně nejvýraznější, v pásmu vyšších frekvencí to již tolik patrné není. Velikosti amplitudových spekter jsou srovnatelné, zejména pak v porovnání s podélným směrem. Upevnění S 15 dosahuje nejvyšší úrovně zrychlení vibrací opět na 550 ÷ 750 Hz, resp. 850 ÷ 1000 Hz. Pro úsek v oblouku se jedná o nejdůležitější pásmo z celého měřeného signálu na kolejnici i na pražci. Nejvyšších amplitud zrychlení je přitom dosaženo v úzkém pásmu blízko frekvence 600 Hz. Upevnění KS má na kolejnici stejné významné frekvenční oblasti, jako upevnění S 15. Z celého měřeného spektra se jedná o nejdominantnější pásma. Úroveň zrychlení vibrací zde dosahuje hodnot až $1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Na pražci je pak významná zejména frekvence 600 Hz, kde dosahuje amplitudové spektrum zrychlení do $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, resp. frekvence 850 Hz s přibližně polovičními hodnotami. Vibrace šířící se konstrukcemi pražcového podloží

a zemním tělesem již nemají ve sledované oblasti žádné výraznější frekvence. Maximální hodnoty amplitudového spektra ve všech směrech působení mají v pásmu vyšších frekvencí 400 ÷ 1000 Hz na svědomí opět nákladní vlaky. Tato skutečnost je platná zejména pro betonový pražec.

Analýzou amplitudového spektra lze vysledovat, že ve svislém směru dochází k výrazně vyšším hodnotám zrychlení na hlavách obou pražců než ve směru příčném či podélném. Tato zrychlení působí na středních frekvencích od 80 Hz do 400 Hz, které rostou se zvyšující se rychlostí a dochází tak k vyššímu příspěvku hluku. Potvrzuje se, že významný vliv na dynamiku namáhání tratě má hmotnost vozidla. U nákladních a rychlíkových souprav jsou hodnoty amplitudového spektra zrychlení asi čtyřikrát vyšší než u motorových osobních vlaků či vozu MVTV 2-035 jedoucích srovnatelnou rychlostí. Frekvenční rozsah se přitom mění jen nepatrně.

Ocelový Y pražec dosahuje na srovnatelných frekvencích zpravidla vyšších amplitud zrychlení, než pražec betonový. To indikuje větší pružnost ocelového pražce. Obecně lze říci, že k největšímu namáhání kolejových částí dochází při větších hodnotách amplitud zrychlení současně s nižšími frekvenčními oblastmi, kdy posuny konstrukce jsou nejvýraznější. Upevnění S 15 vykazuje v kolejovém roštu horší tlumící vlastnosti, a to nezávisle na typu a hmotnosti kolejového vozidla. Rozdíly se zmenšují se vzrůstající vzdáleností snímače od osy koleje. Zatímco rozdíly na hlavě pražce jsou vyšší, v kolejovém loži a ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje se rozdíly mezi konstrukcemi stírají. Lze také vysledovat, že účinky loženého nákladního vlaku nevykazují mezi srovnávanými konstrukcemi takové rozdíly jako je tomu u lehké motorové jednotky RegioNova. Zatížení působící na kolejový rošt s ocelovými pražci Y je lépe rozeseno do kolejového lože. V patě kolejového lože a ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje vykazuje v přímém úseku trati ocelový pražec Y dokonce příznivější vlastnosti, než pražec betonový.

Vysvětlení rozdílných hodnot zrychlení vibrací v závislosti na straně měření v oblouku je možné pomocí problematiky průjezdu vozidla obloukem. Tento děj je ovlivněn především projektovaným převýšením koleje a jízdní rychlostí vozidla a tedy nedostatkem, příp. přebytkem převýšení. Dle teoretických předpokladů by mělo dojít u většiny souprav vlivem nedostatku převýšení ke zvětšení zatížení vnějšího kolejnicového pásu. V rozložení kolových sil by mělo při průjezdu vozidla dojít k nárůstu vodící a svislé kolové síly a vlivem toho ke zvýšení vibrací na vnější straně oblouku. Analýza dat však tyto předpoklady nepotvrdila. Z výsledků je zřejmé, že horší odezva na zatížení je viditelná na nepřevýšené straně koleje. U akcelerometrů na vnitřní straně oblouku dochází většinou ke zvyšování hodnot zrychlení vibrací na nižších frekvencích do 200 Hz, vyšší frekvence zůstávají stejné. To poukazuje, že příčina tohoto jevu souvisí se silovým působením dvojkolí vozidel, které je ve skutečnosti složitější, než uvedené teoretické předpoklady.

Z výsledků měření je dále možné vysledovat, že zatímco nerozevřená strana ocelového pražce obsahuje poměrně významné složky zrychlení na frekvencích 500 Hz až 1000 Hz, tak rozevřená část pražce je zatížena spíše dynamickými jevy při nižších frekvencích. Z hlediska akustických emisí tak bude nerozevřená část pražce pravděpodobně více exponovaná, než rozevřená část.

7.2.2.2.2 Frekvenční analýza akustického tlaku

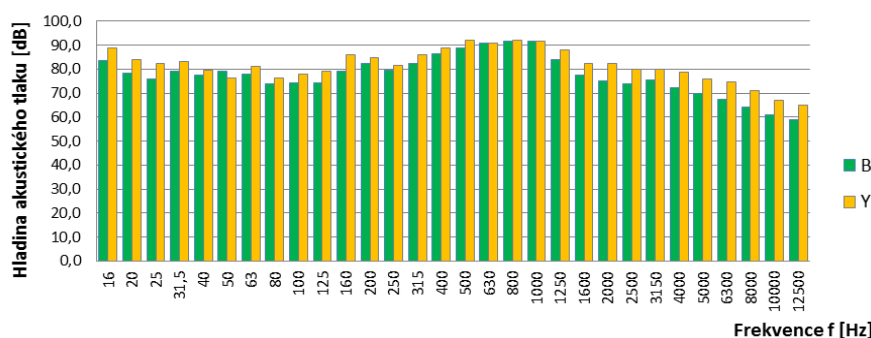
V rámci frekvenční analýzy akustického tlaku byly vyhotoveny grafy uvedené v příloze C. První sloupec grafů představuje časový průběh akustického tlaku, druhý pak amplitudové frekvenční spektrum akustického tlaku. Spektra byla vypočtena přímou aplikací rychlé Fourierovy transformace. Měřítka frekvenční vodorovné osy bylo zvoleno s horním omezením 2,0 kHz. Bylo tak učiněno s ohledem na předcházející úlohy [53], kdy zpravidla k této hranici probíhají v konstrukci nejzajímavější děje. Měřítka osy nebylo zbytečně prodlužováno s ohledem na rozlišovací schopnosti grafů.

Jinou vhodnou metodou analýzy je třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku. Ta byla provedena v pásmu středních frekvencí 16 Hz až 12,5 kHz. Dolní omezení bylo zvoleno jako hranice slyšitelného pásma, horní pak jako hranice oblasti, ve které se navrhuje technická protihluková opatření staveb [97, 98]. Pro zpracování výsledků nebyl použit váhový filtr, neboť se jedná o technické srovnávací měření, nikoliv o hygienické měření. Signál každého vlaku měřeného na stanovišti byl zpracován do podoby sloupcového grafu třetinooktávového kmitočtového pásma. Svislá osa znázorňuje jednotlivá frekvenční pásma, vodorovná osa pak odpovídající průměrné hladiny akustického tlaku.

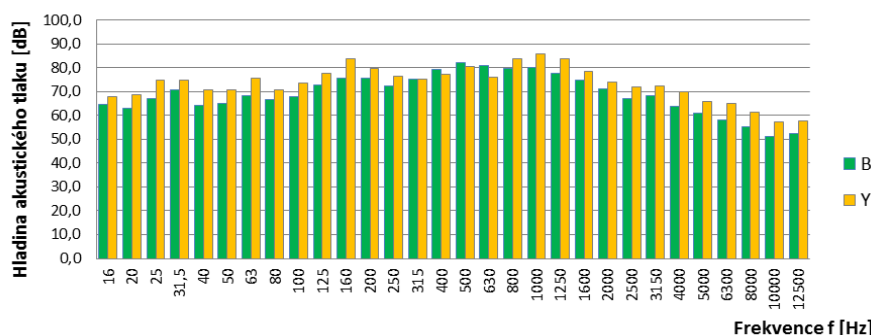
Z výsledků měření lze porovnat hlučnost jednotlivých typů železničního svršku případně najít další zákonitosti mezi konstrukcí či rychlostí vozidla a její odezvou v podobě hluku. Uvedu-li předpokládanou závislost mezi rychlostí a velikostí průměrné hladiny akustického tlaku, lze očekávat, že odezva bude přímo úměrná rychlosti měřené soustavy. Tato skutečnost by měla být nejlépe viditelná v přímém úseku trati při průjezdu souprav stejných parametrů, ale s jinou rychlostí. Ve vybraném příkladu činí rozdíl v rychlosti osobních vlaků $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. U bližšího mikrofону je rozdíl ve velikosti emitovaného hluku největší na frekvenci 40 Hz (až 7 dB). V ostatních intervalech se pohybují maximálně do 5 dB. U vzdálenějšího mikrofónu byly také naměřeny vyšší hodnoty na stejných frekvencích, ale například ve středním poli na frekvencích 400 Hz až 1000 Hz jsou odezvy měřených průjezdů srovnatelné. Dále porovnáám průjezd lehké motorové jednotky RegioNova a loženého nákladního vlaku. Rychlosti uvedených vozidel byly $66 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, resp. $67 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Ze srovnání je patrný relativně stejný frekvenční průběh, až na malou výchytku u nižších frekvencí, kde se u RegioNovy nachází maximální hodnoty průměrné hladiny akustického tlaku, zatímco nákladní vlak má nejvyšší hodnoty na intervalu 400 Hz až 1000 Hz. Mezi těmito vozidly je rozdíl v hlučnosti průměrně do 10 dB. Z těchto poznatků lze vyvodit závěr, že hmotnost vozu má na průměrnou hladinu akustického tlaku vyšší vliv než samotná rychlost.

V dalším kroku porovnáám průjezd srovnatelných vlaků na stanovišti s jiným železničním svrškem. Pro stanoviště v oblouku byly zvoleny soupravy motorových jednotek RegioNova, jedoucí stejnou rychlostí $67 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Nasazení těchto souprav na regionální trať je velmi časté. V grafech obr. 7-27 a obr. 7-28 jsou znázorněny výsledky bližšího i vzdálenějšího stanoviště vně oblouku pro betonové pražce SB 8P (zelená barva) i pro ocelové Y pražce (žlutá barva). Na obou mikrofónech je zřetelné, že konstrukce s ocelovými pražci vykazuje při průjezdu vlaků vyšší hodnoty průměrné hladiny akustického tlaku. Nejvyšší rozdíly až 7 dB jsou na nízkých frekvencích, zatímco ve středním poli 400 Hz

až 630 Hz se naopak vyskytují mírně vyšší hodnoty do 2 dB u betonových pražců. Celkově lze považovat za hlučnější konstrukci s ocelovými pražci. Pro ilustraci jsem provedl energetické součty v oblasti nejslyšitelnějšího pásma 100 Hz až 5,0 kHz. Výsledky jsou přehledně uvedeny v tab. 7-25. Je z nich zřejmé, že větší rozdíly ohledně jednotlivých typů konstrukcí jsou na nepřevýšené straně oblouku. Rozdíly v hladinách akustického tlaku zde činí 2 dB až 3 dB. Ocelový pražec tak vychází méně příznivě. Tyto rozdíly však nejsou nikterak zásadní. Na převýšené straně oblouku jsou navíc hladiny akustického tlaku naprosto srovnatelné.



Obr. 7-27 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M2; Upevnění S 15, vlak č. 2, lokalita Popelín; upevnění KS, vlak č. 6, lokalita Kamenný Malíkov; zdroj: autor



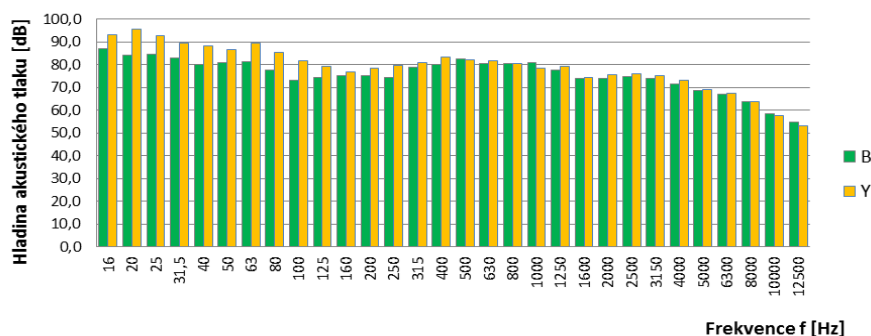
Obr. 7-28 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M3 (6,0 m); Upevnění S 15, vlak č. 2, lokalita Popelín; upevnění KS, vlak č. 6, lokalita Kamenný Malíkov; zdroj: autor

Snímač	Upevnění S 15				Upevnění KS			
	M0	M1	M2	M3	M0	M1	M2	M3
L_p [dB]	100	92	95	87	98	89	95	87

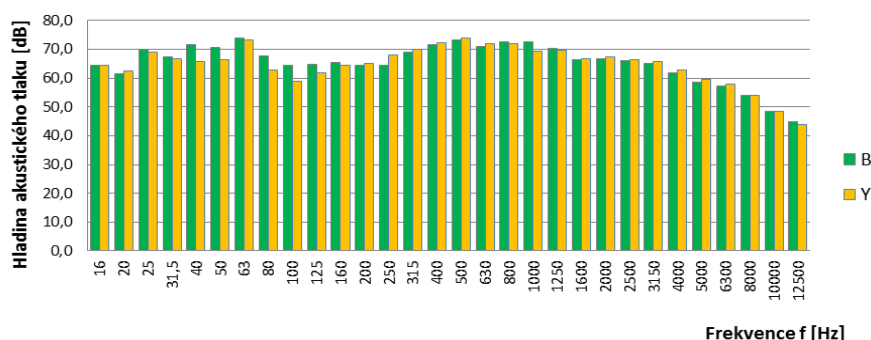
Tab. 7-25 Energetické součty v oblasti 100 Hz až 5,0 kHz; Upevnění S 15, vlak č. 2, lokalita Popelín; upevnění KS, vlak č. 6, lokalita Kamenný Malíkov; zdroj: autor

Na stanovišti v přímé byla srovnávána motorová jednotka RegioNova. Rychlost průjezdu měřeným úsekem byla $66 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Blíže ke koleji je dobře patrný rozdíl mezi ocelovým a betonovým pražcem. V pásmu do střední frekvence 160 Hz jsou zaznamenány vyšší hodnoty u ocelového pražce. Rozdíl činí až 10 dB. Od frekvence 160 Hz výše lze obě testované konstrukce považovat za srovnatelné s rozdíly do 1 dB až 2 dB ve prospěch upevnění KS. Je vhodné podotknout, že do této oblasti spadá také nejlépe slyšitelné pásmo

lidského ucha. Na vzdálenějším stanovišti jsou hodnoty do 160 Hz naopak příznivější u upevnění S 15. Rozdíly v hladinách akustického tlaku jsou však malé do 3 dB. Energetický součet na frekvencích 100 Hz až 5,0 kHz zjištění z třetinooktávové analýzy potvrzuje. Rozdíl na bližším stanovišti činí 8 dB ve prospěch betonového pražce, zatímco na vzdálenějším stanovišti vychází příznivěji ocelový pražec a to o hodnotu 2 dB.



Obr. 7-29 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M0; Upevnění S 15 a upevnění KS, vlak č. 3, lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor



Obr. 7-30 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M1 (6,0 m); Upevnění S 15 a upevnění KS, vlak č. 3, lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

Snímač	Upevnění S 15		Upevnění KS	
	M0	M1	M0	M1
L_p [dB]	101	77	93	79

Tab. 7-26 Energetické součty v oblasti 100 Hz až 5,0 kHz; Upevnění S 15 a upevnění KS, vlak č. 4, lokalita Počátky-Žirovnice; zdroj: autor

7.2.2.3 Shrnutí

Provozní dynamická měření, provedená na vybraných zkušebních úsecích, prokázala vysokou deformační odolnost obou testovaných konstrukcí. Průhyby konstrukce vyvolané účinky provozované dopravy jsou nejvýraznější ve svislé rovině. Ani zde však nepřekračuje pokles kolejového roštu hodnoty řádu jednotek milimetrů. Zdvihy jsou v tomto ohledu asi o řád nižší. Z posunů působících ve směru osy koleje lze vyzorovat dobré pružné deformační vlastnosti použitých systémů upevnění, které jsou vhodným předpokladem pro zřízení bezстыkové koleje. Z provedené analýzy lze rovněž stanovit závěr, že kolejový rošt s betonovými pražci vykazuje lepší setrvačné vlastnosti z pohledu projíždějícího drážního vozidla, než konstrukce s ocelovými pražci. Tato vlastnost má pravděpodobně příčinu

ve vyšší hmotnosti betonových podpor. Z velikosti a orientace příčných posunů srovnávaných konstrukcí lze identifikovat příčné působení vodicích dvojkolí kolejových vozidel, stejně jako průhyb jednotlivých pražců přes jejich střed, který je charakteristický pro železniční svršek v provozu (nikoli ihned po podbití). Velikosti podélných a příčných posunů jsou velice nízké. Nepřekračují hodnoty do 1 mm.

Z vibrační analýzy je zřejmé, že kolejnicové upevnění S 15 na Y pražci nevykazuje tak dobré útlumové vlastnosti jako pružné upevnění KS na betonových pražcích. Toto lze vypočítat zejména u svislého a částečně i podélného zrychlení kmitání, které je způsobeno rotačním pohybem železničního dvojkolí. Amplitudové spektrum Y pražce vykazuje vysoké hodnoty zrychlení vibrací zejména v oblasti kmitočtů 1000 Hz, které již výrazně zasahuje do nejlépe slyšitelného pásma lidského ucha. Tato skutečnost může vést k intenzivnějšímu vjemu hlukové zátěže vyvolané provozem na trati s Y pražci. Ve směru kolmém na osu koleje se na základě analyzovaných dat potvrzují prvotní předpoklady týkající se výhodnějších vlastností ocelových pražců Y (a to i v případě zúženého profilu kolejového lože). Oproti jiným konstrukcím uzlu upevnění (betonový pražec, pružná upevnění), průběh spektra zjištěného na Y pražci je velmi podobný průběhu spektra zjištěného na kolejnici. Nepochází tedy k výraznému útlumu vyšších frekvenčních složek, a tedy k výraznému posunu významných složek k nižším frekvencím. Tato skutečnost by se mohla projevit nižší schopností uzlu upevnění tlumit šíření akustické energie, což však bylo nakonec vyvráceno v rámci akustické analýzy.

Přestože u odborné veřejnosti dosud převládal názor, že kolejový rošt s ocelovými pražci tvaru Y je výrazně hlučnější než klasický kolejový rošt s příčnými betonovými pražci, tak tato skutečnost nebyla v rámci uskutečněných měření a analýz hluku potvrzena. Provozní akustická měření provedená na vybraných úsecích trati prokázala, že obě konstrukce železničního svršku, tedy s ocelovými pražci tvaru Y a betonovými pražci SB 8P jsou téměř srovnatelné. Tuto skutečnost potvrzuje jak analýza a srovnání akustických hladin TEL, tak časové a frekvenční charakteristiky.

Na základě provedených analýz je možné konstatovat, že použité metodiky poskytují dobré výsledky a závěry. Měřené a vypočítané veličiny se vyznačují dostatečnou přesností a vypovídající schopností. Ke kvalitnímu zpracování naměřených dat velmi dobře přispěly použité prostředky časové a frekvenční signálové analýzy.

Závěrem lze uvést, že dynamicko-pohybové chování konstrukce kolejového roštu s ocelovými pražci Y je odlišné od chování klasické konstrukce s příčnými podporami. Zároveň však výsledky plně potvrdily, že použití ocelových pražců tvaru Y na regionálních tratích je možné bez výraznějších problémů. Na základě prezentovaných výsledků je možné konstatovat, že tato skutečnost se týká i oblasti akustických parametrů. V tomto okamžiku je potřeba připomenout, že experimentální měření nebyla prováděna za úplně krajních dovolených podmínek, co se týče limitních geometrických parametrů koleje na regionálních tratích. Z hlediska bezpečnosti byl ovšem tento fakt částečně vyrovnán zvýšeným provozním zatížením koleje zkušebního úseku, vyšší traťovou třídou zatížení a z ní vycházejícími vyššími nápravovými tlaky měřených vozidel, než je obvyklé u standardních regionálních tratí, pro které jsou Y pražce přednostně určeny.

7.2.3 Lokality Hranice na Moravě a Napajedla

Cílem měření a analýz bylo sledování způsobu přenosu účinků podélného, příčného a svislého zatížení od železniční dopravy do kolejového lože a dále do konstrukcí železničního spodku a s tím související posuny a vibrace kolejového roštu v úseku koridorových tratí. Současně s tím bylo sledováno šíření hluku od železniční dopravy do prostoru podél trati. Pro účely experimentu byl vybrán kolejový rošt s příčnými betonovými pražci B 91P s bezpodkladnicovým upevněním Pandrol FC I. Jedná se o vývojově starší typ upevnění systému FastClip, které nezajišťuje druhotnou tuhost. Konstrukce železničního svršku s upevněním FC I byla následně porovnávána s referenčním kolejovým rostem s příčnými betonovými pražci B91 S/1 a s upevněním Vossloh W 14. Na základě analýzy pak mělo být rozhodnuto o vhodnosti použití testovaných systémů na koridorových tratích s ohledem na konkrétní případy a požadavky.

Měřicí profily byly situovány v úsecích vybraných koridorových tratí s následujícími parametry:

Lokalita Hranice na Moravě

Měřicí stanoviště je situováno na trati č. dle knižního jízdního řádu 270 (trať Česká Třebová – Přerov – Bohumín). Jedná se o celostátní dráhu, která je v celé své délce elektrizovaná a dvoukolejná. Vybraný úsek je součástí II. a III. tranzitního železničního koridoru. Měřicí profil byl umístěn do staničení koleje č. 2 km 213,692. Jedná se o pravostranný směrový oblouk s následujícími projektovanými parametry:

- $R = 704 \text{ m}$; $V = 110 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; $I = 90 \text{ mm}$; $n_1 = n_2 = 11,14\text{V}$; $D = 113 \text{ mm}$;
 $lp_1 = lp_2 = 138,53 \text{ m}$; $L_i = 641,44 \text{ m}$; kubická parabola.

Podélný sklon koleje je $+4,62 \text{ ‰}$ (klesá směrem k železniční stanici Hranice na Moravě). Trať je zde vedena v mělkém zářezu, měřicí stanoviště je vzdáleno cca 100 m od železničního přejezdu místní komunikace. Trať je navržena pro traťovou třídu zatížení D4/120. Měřený úsek trati byl bez závad na kolejovém roštu. Poslední rekonstrukce byla dokončena v roce 2004. Větší údržba v podobě broušení kolejnic a souvislého podbíjení proběhla v roce 2009.

V lokalitě je zřízena bezstyková kolej normálního rozchodu. Kolejový rošt je tvořen kolejnicemi UIC 60 a betonovými pražci typu B91 S/1. Kolejnice jsou upevněny pomocí bezpodkladnicového systému Vossloh W14.

Vlastní měření v rámci lokality Hranice na Moravě proběhlo dne 16. 7. 2013. Meteorologické podmínky z měřicího dne jsou uvedeny v tab. 7-27. Hodnocená projetá zátěž je přehledně uvedena v tab. 7-28. Ve sloupci poznámka jsou zaznamenány vypočtené hodnoty nedostatku (kladné hodnoty), příp. přebytku převýšení (záporné hodnoty) pro danou rychlost. V rámci měření byly v koleji osazeny snímače s kanálovým označením S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, A0, A1, A2, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A11, A12, A13, A17, A18, A19, A20, M0, M1, M2, M3 dle metodiky měření uvedené v kapitole 4.2.



*Obr. 7-31 Měřicí stanoviště v oblouku s upevněním W 14, lokalita Hranice na Moravě;
zdroj: autor*

Datum	Čas	Počasí	Teplota vzduchu [°C]	Teplota kolejnice [°C]		Vlhkost vzduchu [%]	Atm. tlak [hPa]	Max. vítr [m·s ⁻¹]
				Vnitřní	Vnější			
16. 7. 2013	9:47	Jasno	22,4	14,7	19,1	50	1021	0,0
	10:47	Polojasno	30,1	18,5	21,4	27	1017	0,7
	11:47		29,8	29,4	31,0	34	1020	0,0
	12:47		31,3	15,4	15,9	23	1021	2,0
	13:47		33,7	45,8	47,0	20	1020	2,5

*Tab. 7-27 Meteorologické podmínky v den měření 16. 7. 2013, lokalita Hranice na Moravě;
zdroj: autor*

Hranice na Moravě; 16. 7. 2013							
Pořadí	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr	Rychlost [km·h ⁻¹]	Pozn.
1	11:17	R	362	6	Hranice na Moravě	107	79 mm
2	11:22	Os	163	3	Hranice na Moravě	104	69 mm
3	11:30	EC	380	6	Hranice na Moravě	112	98 mm
4	12:10	N	363	25	Hranice na Moravě	86	11 mm
5	13:17	R	362	6	Hranice na Moravě	110	90 mm
6	13:28	Os	163	3	Hranice na Moravě	101	58 mm

*Tab. 7-28 Projatá hodnocená zátěž v den měření 16. 7. 2013, lokalita Hranice na Moravě;
zdroj: autor*

Lokalita Napajedla

Měřicí stanoviště je situováno na trati č. dle knižního jízdního řádu 330 (trať Břeclav – Přerov). Jedná se o celostátní dráhu, která je rovněž v celé své délce elektrizovaná a dvoukolejná. Zvolený úsek je součástí II. tranzitního železničního koridoru. Měřicí profil

byl umístěn do staničení koleje č. 2 km 152,106. Jedná se o pravostranný směrový oblouk s následujícími projektovanými parametry:

- $R = 761 \text{ m}$; $V = 120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; $I = 91 \text{ mm}$; $n_1 = n_2 = 10,88\text{‰}$; $D = 133 \text{ mm}$; $lp_1 = lp_2 = 173,73 \text{ m}$; $L_i = 573,20 \text{ m}$; kubická parabola.

Podélný sklon koleje je $-3,33 \text{ ‰}$ (klesá směrem k železniční stanici Otrokovice). Trať je zde vedena v mírném násypu a je navržena pro traťovou třídu zatížení D4/120. Ve vzdálenosti asi 180 m od měřicího stanoviště se nachází železniční přejezd a hradlo Žlutava. Kolejový rošt ani pražcové podloží nevykazovaly žádné viditelné známky závad. Poslední rekonstrukce tohoto úseku trati proběhla v roce 1999. Při této rekonstrukci bylo provedeno také broušení kolejnic. Poslední zhutňování štěrkového lože pomocí souvislého podbíjení proběhlo v roce 2011.

Kolej v celém úseku měření je bezстыková o normálním rozchodu. Součástí železničního svršku jsou kolejnice UIC 60 a pražce B91 S/1 z předpjatého železobetonu. Upevnění je typu Pandrol FC I.

Vlastní měření v rámci lokality Napajedla proběhlo dne 17. 7. 2013. Meteorologické podmínky z měřicího dne jsou uvedeny v tab. 7-29. Hodnocená projetá zátěž je přehledně uvedena v tab. 7-30. Ve sloupci poznámka jsou zaznamenány vypočtené hodnoty nedostatku (kladné hodnoty), příp. přebytku převýšení (záporné hodnoty) pro danou rychlost. V rámci měření byly v koleji osazeny snímače s kanálovým označením S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, A0, A1, A2, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A11, A12, A13, A17, A18, A19, A20, M0, M1, M2, M3.



Obr. 7-32 Měřicí stanoviště v oblouku s upevněním FC I, lokalita Napajedla; zdroj: autor

Datum	Čas	Počasí	Teplota vzduchu [°C]	Teplota kolejnice [°C]		Vlhkost vzduchu [%]	Atm. tlak [hPa]	Max. vítr [m·s ⁻¹]
				Vnitřní	Vnější			
17. 7. 2013	8:30	Jasno	23,1	33,2	33,7	49	1031	0,8
	9:30		26,4	41,6	44,6	43	1031	0,8
	10:30		29,1	50,7	53,5	33	1030	1,4
	11:30		31,1	48,5	48,9	25	1030	1,8
	12:30		39,2	56,7	54,6	20	1026	0,0
	13:30		38,8	49,7	49,3	20	1027	1,0

*Tab. 7-29 Meteorologické podmínky v den měření 17. 7. 2013, lokalita Napajedla;
zdroj: autor*

Napajedla; 17. 7. 2013							
Pořadí	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr	Rychlost [km·h ⁻¹]	Pozn.
1	8:51	N	363	25	Otrokovice	83	-27 mm
2	11:20	R	150	5	Otrokovice	108	48 mm
3	11:49	R	362	5	Napajedla	110	55 mm
4	12:18	EC	380	6	Napajedla	114	69 mm
5	12:43	Os	163	3	Otrokovice	110	55 mm
6	13:16	Os	362	3	Napajedla	115	73 mm

Tab. 7-30 Projeté hodnocená zátěž v den měření 17. 7. 2013, lokalita Napajedla; zdroj: autor

K práci s naměřenými signály byly opět použity programy DeweSoft, FlexPro 7.0, Microsoft Excel 2010 a VibroDiagRail.

7.2.3.1 Časová analýza

7.2.3.1.1 Časová analýza posunů

Pro správnou interpretaci výsledků měření byla určena následující znaménková konvence:

- minus (-): pohyb kolejnice nebo pražce podélně proti vlaku, příčně dovnitř oblouku, resp. svisle směrem dolů (pokles);
- plus (+): pohyb kolejnice nebo pražce podélně ve směru vlaku, příčně vně oblouku, resp. svisle směrem nahoru (zdvih).

V rámci časové analýzy byly zjištěny následující posuny:

- podélné posuny u upevnění W 14 -0,8 mm až 0,5 mm na kolejnici, resp. -0,3 mm až 0,4 mm na pražci, přičemž mediány na kolejnici jsou -0,3 mm a 0,3 mm a na pražci -0,1 mm a 0,2 mm;
- podélné posuny u upevnění FC I -1,6 mm až 2,2 mm na kolejnici, resp. -0,4 mm až 0,2 mm na pražci, přičemž mediány na kolejnici jsou -0,3 mm a 0,3 mm a na pražci -0,1 mm a 0,1 mm;

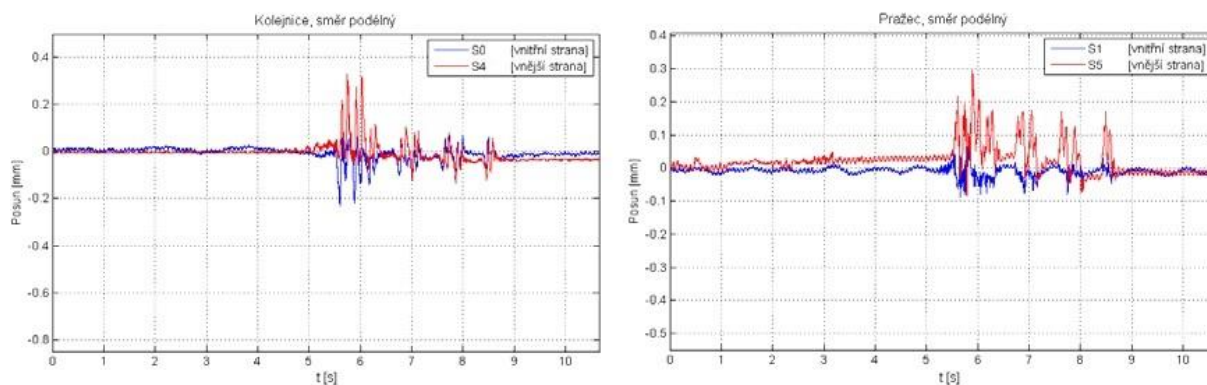
- příčné posuny pražce s upevněním W 14 -0,2 mm až 0,6 mm s mediány -0,1 mm a 0,4 mm;
- příčné posuny pražce s upevněním FC I -0,3 mm až 0,3 mm s mediány 0,0 mm a 0,1 mm;
- svislé posuny pražce s upevněním W 14 -0,8 mm až 0,3 mm s mediány -0,5 mm a 0,1 mm.
- svislé posuny pražce s upevněním FC I -0,6 mm až 0,6 mm s mediány -0,2 mm a 0,1 mm.

Ze srovnání hodnot lokálních extrémů je názorně patrné, že obě sledované konstrukce vytvářejí stabilní podporu provozované kolejové dopravy. Maximální hodnoty posunů zpravidla nepřekračují na kolejnici hranici 2 mm a na pražci dokonce nedosahují ani polovičních hodnot. V porovnání s měřeními popsány v kapitole 7.2.2.1.1 již není tolik dominantní svislý směr. To může být způsobeno vyššími jízdními rychlostmi z toho vyplývající změnou silového působení vozidla na konstrukci tratě, kdy tíhové a setrvačné zatížení vozidla je více roznášeno prostřednictvím zejména podélných sil. Dalším pravděpodobným důvodem je rozdílná kvalita v podepření pražců. Mediány posunů kolejového roštu vycházejí v podélném a příčném směru působení srovnatelné, přestože dopravní zatížení v lokalitách Napajedla a zejména pak u Hranic na Moravě je vyšší, než v případě trati Jihlava – Veselí nad Lužnicí. Svislý směr pak vychází dokonce výrazně lépe, než zmíněná trať na Vysočině. Mediány jsou zde čtvrtinové až třetinové. Tuto skutečnost může mít na svědomí jak subtilnější konstrukce železničního svršku použitá na trati Jihlava – Veselí nad Lužnicí, tak i lepší technický stav, ve kterém jsou koridorové tratě udržované.

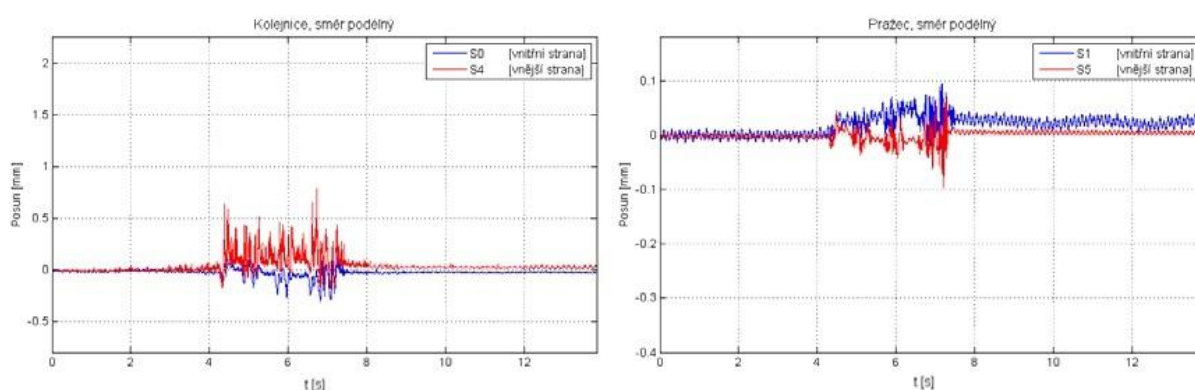
Chování testovaných upevnění W 14 a FC I je odlišné. Konstrukce upevnění FC I umožňuje díky menší tuhosti a speciálně profilované podložce pod patu kolejnice 6530 až trojnásobně vyšší posuny kolejnice, přičemž však posuny pražce jsou ve všech sledovaných směrech obecně nižší. Do jaké míry může zvýšené kmitání kolejnice ovlivnit dynamické vlastnosti upevnění FC I a zda to bude mít výraznější vliv např. na vznik kolejnicových vad, napoví výsledky vibrodiagnostiky v kapitolách níže.

V oblouku vzniká v důsledku přenosu podélných sil na styku kolo – kolejnice mírné pootočení kolejového roštu vůči vertikální ose procházející těžištěm pražce. Dochází přitom k posouvání koncové části pražce a kolejnice na nepřevýšené straně oblouku v protisměru jízdy vlaku, zatímco na převýšené straně koleje má tento posun opačný charakter. K oběma dějům dochází přitom současně. Vše je dobře znázorněno na obr. 7-33 a obr. 7-34. Maximální rozkmity pak dosahují hodnot kolem 0,8 mm na kolejnici, přičemž méně příznivě vychází obecně upevnění FC I. Na pražci je pak rozkmit přibližně poloviční. Z hlediska absolutní velikosti lze hovořit o statisticky vyšších zjištěných hodnotách na pražci B 91S/1.

V příčném směru se neopakuje situace z měření na ocelových pražcích resp. referenčních betonových pražcích SB 8P, kde byl patrný ohyb přes středovou část pražců. Může to obecně souviset s vyššími ohybovými momenty, na něž jsou betonové pražce B 91S/1 resp. B 91P dimenzovány, stejně tak jako s lepší kvalitou podbití udržovaných koridorových tratí. Příčné posuny probíhaly v naprosté většině případů pouze vně oblouku, tedy jako reakce na odstředivé síly jedoucího vozidla.



Obr. 7-33 Vlevo podélné posuny kolejnice, vpravo podélné posuny pražce, uzel upevnění W 14, vlak č. 2 (viz tab. 7-28), lokalita Hranice na Moravě; zdroj: autor



Obr. 7-34 Vlevo podélné posuny kolejnice, vpravo podélné posuny pražce, uzel upevnění FC I vlak č. 6 (viz tab. 7-30), lokalita Napajedla; zdroj: autor

7.2.3.1.2 Časová analýza zrychlení vibrací

Časová analýza zrychlení vibrací byla opět provedena ve formě efektivních hodnot RMS [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]. Ty byly doplněny kvůli nízkým hodnotám z pražcového podloží o hladiny zrychlení vibrací L_{aef} [dB]. Logaritmická stupnice má v těchto případech lepší rozlišovací schopnost a dokáže vyzdvihnout i malé rozdíly v nízkých efektivních hodnotách. Hladiny zrychlení vibrací jsou v tab. 7-31 a v tab. 7-32 uvedeny v kulatých závorkách. Před vlastní analýzou efektivních hodnot je vhodné podotknout, že v extrémních případech dosahovala maximální zrychlení na kolejnici hodnot řádově vyšších než $1400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Na pražci se jedná o lokální maxima v řádu do $280 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (W 14), resp. do $130 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (FC I). V kolejovém loži, resp. ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje vycházejí extrémy u obou testovaných konstrukcí do $4,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, resp. do $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Extrémů bylo nejčastěji dosaženo ve svislém směru. Nejmenší hodnoty pak vycházely v podélném směru.

Efektivní hodnoty zrychlení vibrací na kolejnici vycházejí ve většině případů méně příznivě pro upevnění Pandrol FC I, a to bez ohledu na směr působení. Obecně lze prohlásit, že RMS vycházejí u FC I na kolejnici nejčastěji dvoj- až třináásobně vyšší, než u W 14. Nejdominantnější jsou přitom vibrace příčné (pouze W 14) a svislé (obě upevnění). Absolutně nejvyšších hodnot, až $117 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ pro W 14 a až $161 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ pro FC I, je dosaženo ve svislém směru. Jako téměř pokaždé vyvozují nejvyšší účinky nákladní vlaky.

Z hlediska vibrací na hlavách pražců vychází naopak příznivěji upevnění FC I. Velmi často dosahují efektivní hodnoty zrychlení až polovičních hodnot vůči srovnávanému upevnění W 14. Nejméně zajímavý je opět podélný směr. Velikosti příčných a svislých vibrací jsou na pražcích obou testovaných konstrukcí srovnatelné. Maximálních hodnot RMS je v obou případech dosaženo ve svislém směru. U upevnění W 14 je to $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, u upevnění FC I pak $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Uvedené skutečnosti poukazují na nižší tuhost upevnění FC I. Maximální hodnoty jsou tradičně způsobeny nákladním vlakem.

Na hraně kolejového lože a ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje jsou obě konstrukce srovnatelné. Rozdíly v efektivních hladinách zrychlení vibrací se pohybují nejčastěji v rozmezí 1 až 3 dB, v ojedinělých případech až 6 dB (tj. dvojnásobná hodnota zrychlení vzhledem ke srovnávanému upevnění). Na vnitřní straně vychází v tomto ohledu příznivěji upevnění W 14, zatímco na straně vnější je tomu naopak. Maximální hodnoty v kolejovém loži nepřekračují úroveň 108 dB, což odpovídá RMS do $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje je maximální hladina zrychlení už jen 94 dB, tj. cca $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. V uvedených případech se tak jedná o velmi nízké hodnoty.

Porovná-li velikosti zrychlení vibrací na nepřevýšeném a převýšeném kolejnicovém pásu, lze konstatovat, že upevnění W 14 vykazuje na kolejnici lepší vlastnosti na nepřevýšené straně a na pražci naopak na straně převýšené. Upevnění FC I má vyjma podélných vibrací na hlavě pražce, resp. vibrací na hraně kolejového lože hodnoty vždy vyšší na straně převýšené. Uskutečněná měření poskytla dostatečný vzorek dat. Aby však bylo možné danou závislost potvrdit a statisticky zpřesnit, bylo by vhodné vyhodnotit více vzorků a nejlépe z různých lokalit. Již měření v lokalitách Kamenný Malíkov a Popelín ukázala, že není vždy možné se opřít výhradně o teoretické předpoklady, při kterých jsou větší dynamické účinky očekávány na převýšené straně koleje, tedy na straně, kde vlivem převládající jízdy vozidel s nedostatkem převýšení dochází k přetížení vnějšího kolejnicového pásu.

Měřicí bod		Upevnění W 14, efektivní hodnoty RMS [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] ([dB]), lokalita Hranice na Moravě					
		EC 11:30 112 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 13:17 110 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 11:17 107 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	Os 11:22 104 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	Os 13:28 101 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	N 12:10 86 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
Bod I	A0	17 (145)	42 (152)	36 (151)	18 (145)	17 (145)	40 (152)
	A4	1 (120)	3 (130)	3 (130)	2 (126)	1 (120)	4 (132)
	A1	34 (151)	85 (159)	71 (157)	33 (150)	31 (150)	86 (159)
	A5	4 (132)	8 (138)	7 (137)	4 (132)	3 (130)	10 (140)
	A2	28 (149)	65 (156)	55 (155)	32 (150)	27 (149)	70 (157)
	A6	4 (132)	7 (137)	7 (137)	5 (134)	4 (132)	12 (142)
	A17	(102)	(101)	(101)	(104)	(99)	(105)
	A18	(66)	(68)	(68)	(68)	(63)	(68)

Tab. 7-31 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS; upevnění W 14; lokalita Hranice na Moravě; zdroj: autor

Měřicí bod		Upevnění W 14, efektivní hodnoty RMS [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] ([dB]), lokalita Hranice na Moravě					
		EC 11:30 112 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 13:17 110 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 11:17 107 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	Os 11:22 104 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	Os 13:28 101 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	N 12:10 86 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
Bod 2	A7	16 (144)	23 (147)	22 (147)	14 (143)	13 (142)	20 (146)
	A11	2 (126)	4 (132)	4 (132)	2 (126)	2 (126)	4 (132)
	A8	22 (147)	48 (154)	47 (153)	30 (150)	29 (149)	46 (153)
	A12	4 (132)	9 (139)	10 (140)	5 (134)	4 (132)	10 (140)
	A9	117 (161)	42 (152)	59 (155)	23 (147)	23 (147)	90 (159)
	A13	3 (130)	6 (136)	7 (137)	4 (132)	3 (130)	9 (139)
	A19	(104)	(105)	(105)	(107)	(101)	(101)
	A20	(91)	(93)	(94)	(94)	(90)	(92)

Tab. 7-31 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS; upevnění W 14; lokalita Hranice na Moravě (pokračování); zdroj: autor

Měřicí bod		Upevnění FC I, efektivní hodnoty RMS [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] ([dB]), lokalita Napajedla					
		Os 13:16 115 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	EC 12:18 114 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 11:49 110 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	Os 12:43 110 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 11:20 108 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	N 8:51 83 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
Bod 1	A0	15 (144)	18 (145)	26 (148)	21 (146)	41 (152)	58 (155)
	A4	1 (120)	2 (126)	2 (126)	2 (126)	3 (130)	4 (132)
	A1	21 (146)	29 (149)	38 (152)	33 (150)	58 (155)	78 (158)
	A5	2 (126)	4 (132)	4 (132)	3 (130)	5 (134)	6 (136)
	A2	38 (152)	51 (154)	81 (158)	66 (156)	126 (162)	161 (164)
	A6	2 (126)	3 (130)	4 (132)	3 (130)	5 (134)	7 (137)
	A17	(102)	(105)	(103)	(105)	(103)	(108)
	A18	(69)	(71)	(70)	(72)	(68)	(73)
Bod 2	A7	39 (152)	67 (157)	61 (156)	49 (154)	66 (156)	94 (159)
	A11	1 (120)	1 (120)	1 (120)	1 (120)	2 (126)	2 (126)
	A8	47 (153)	82 (158)	71 (157)	54 (155)	78 (158)	95 (160)
	A12	2 (126)	4 (132)	4 (132)	3 (130)	5 (134)	6 (136)
	A9	68 (157)	126 (162)	120 (162)	87 (159)	121 (162)	144 (163)
	A13	4 (132)	7 (137)	6 (136)	5 (134)	6 (136)	9 (139)
	A19	(99)	(101)	(100)	(100)	(99)	(100)
	A20	(91)	(93)	(91)	(93)	(90)	(91)

Tab. 7-32 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS; upevnění FC I; lokalita Napajedla; zdroj: autor

7.2.3.1.3 Časová analýza akustického tlaku

Pro časovou analýzu akustického tlaku byla vybrána hladina expozice průjezdu TEL [dB(A)] vážená filtrem A. Velikosti hladin akustického tlaku se pohybují v rozmezí 93 dB(A) až 104 dB(A) na hraně kolejového lože, resp. 85 dB(A) až 95 dB(A) ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje. Hladiny TEL se na hraně kolejového lože liší u srovnatelných kategorií vlaků výjimečně o 4 dB(A), přičemž medián rozdílů hodnot je nulový a průměrný rozdíl je

0,3 dB(A) ve prospěch upevnění FC I. Ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje jsou maximální rozdíly do 3 dB(A), medián 1 dB(A) a průměrný rozdíl činí 0,3 dB(A) opět ve prospěch upevnění FC I. Lze však očekávat, že výsledky budou pro upevnění FC I o trochu příznivější. Nejhuře zde totiž vycházejí průjezdy rychlíkových souprav. Ty měly v dané lokalitě o jeden vůz méně, než soupravy z Hranic na Moravě. Na konečný výsledek tak má větší vliv lokomotiva soupravy, u níž jsou hladiny TEL zpravidla nejvyšší [98]. Přes uvedené skutečnosti lze však oba systémy upevnění považovat za srovnatelné.

Při porovnání nepřevýšené a převýšené strany koleje je možné učinit opačný závěr, než v případě měření ocelových pražců tvaru Y a referenčních příčných betonových pražců. Vyšší hodnoty TEL vycházejí na vnější, tedy převýšené straně koleje. Jelikož však měření parametrů upevnění W 14 i FC I probíhala ve vnějších kolejích dvojkolejných tratí, mohou být výsledky z nepřevýšeného pásu ovlivněny přítomností přilehlé traťové koleje. Hladiny TEL mohly být sníženy vlivem absorpce hluku kolejovým ložem.

Měřicí bod	Upevnění W 14, hladiny expozice průjezdu TEL [dB(A)], lokalita Hranice na Moravě					
	EC 11:30 112 km·h ⁻¹	R 13:17 110 km·h ⁻¹	R 11:17 107 km·h ⁻¹	Os 11:22 104 km·h ⁻¹	Os 13:28 101 km·h ⁻¹	N 12:10 86 km·h ⁻¹
M0	95	101	102	98	97	103
M1	86	92	91	87	86	93
M2	95	101	102	98	97	102
M3	87	93	93	90	89	94

Tab. 7-33 Hladiny expozice průjezdu TEL; upevnění W 14; lokalita Hranice na Moravě;
zdroj: autor

Měřicí bod	Upevnění FC I, hladiny expozice průjezdu TEL [dB(A)], lokalita Napajedla					
	Os 13:16 115 km·h ⁻¹	EC 12:18 114 km·h ⁻¹	R 11:49 110 km·h ⁻¹	Os 12:43 110 km·h ⁻¹	R 11:20 108 km·h ⁻¹	N 8:51 83 km·h ⁻¹
M0	94	93	100	95	102	104
M1	86	85	93	87	94	95
M2	97	97	102	97	103	104
M3	87	88	93	88	94	95

Tab. 7-34 Hladiny expozice průjezdu TEL; upevnění FC I; lokalita Napajedla; zdroj: autor

7.2.3.2 Frekvenční analýza

7.2.3.2.1 Frekvenční analýza zrychlení vibrací

Jako součást frekvenční analýzy byly vyhotoveny grafy uvedené v příloze D. První sloupec grafů představuje časový průběh zrychlení vibrací, druhý pak amplitudové spektrum zrychlení vibrací získané rychlou Fourierovou transformací časové řady. Základní analýza byla prováděna ve třech frekvenčních oblastech v souladu s kapitolou 7.1.2.

Z časových průběhů zrychlení vibrací je možné snadno identifikovat jednotlivé podvozky, potažmo nápravy vozidel. Na trati s upevněním W 14 je to umožněno jak na kolejnici, tak i na pražci a na hraně kolejového lože, a to ve všech měřených směrech.

Signály upevnění FC I jsou dobře čitelné pouze na pražci ve svislém směru, příp. v kolejovém loži. Maximální hodnoty zrychlení jsou uvedeny v kapitole 7.2.3.1.2.

V pásmu nízkých frekvencí je úroveň vibrací na kolejovém roštu velmi nízká. Z globálního pohledu lze hodnotit jako zajímavé pouze vibrace u upevnění W 14. V podélném směru na kolejnici je v některých případech dokonce dosaženo maximálních amplitud z celého hodnoceného spektra. Z hlediska frekvencí se jedná o 20 Hz a 80 Hz. Amplitudy zde mají velikosti až $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Neméně významné jsou také svislé vibrace na pražci. Zde jsou vytvořeny shluky o frekvencích $60 \div 80 \text{ Hz}$ s amplitudami do $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Shrnu-li poznatky z nízkofrekvenční analýzy kolejového roštu, pak upevnění W 14 má na kolejnici klíčové již výše zmíněné frekvence 20 Hz a 80 Hz, tedy frekvence, za jejichž vznikem stojí působení podvozků, resp. jednotlivých dvojkolí kolejových vozidel. Nejvyšších hodnot amplitud je zde dosaženo v podélném směru, následuje směr svislý a příčný. Velikosti zrychlení se pohybují v řádech desetin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Upevnění FC I vykazuje nejvyšší hodnoty na kolejnici na frekvencích $20 \div 60 \text{ Hz}$ v podélném směru, resp. na frekvenci 20 Hz v příčném a svislém směru. Amplitudy jsou zde poloviční až třetinové ve srovnání s upevněním W 14. Na pražci se jeví jako zásadní frekvenční shluky $60 \div 80 \text{ Hz}$. To platí pro oba typy upevnění. Amplitudy se zde pohybují v řádech setin až tisícín $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Nejvýznamnější je v tomto ohledu směr svislý, následuje podélný a nejméně výrazný příčný směr. Upevnění FC I vykazuje přibližně poloviční hodnoty, než upevnění W 14. Dominantní jsou v nízkofrekvenčním pásmu $60 \div 80 \text{ Hz}$ vibrace šířící se pražcovým podložím. Vyjma snímače na hraně kolejového lože nepřevýšené části koleje zachycují nízkofrekvenční složky veškeré zajímavé děje v kolejovém loži i ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje. Amplitudy zrychlení se pohybují v hodnotách řádově v setinách $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ na hraně kolejového lože, resp. řádově v tisícínách $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje. Porovná-li mezi sebou vnitřní a vnější stranu směrového oblouku, lze konstatovat, že amplitudy na vnější straně vycházejí ve většině případů nepatrně vyšší, než na straně vnitřní. Není to však úplné pravidlo a nelze to tedy považovat za trend. Nejvyšší amplitudy jsou zpravidla vyvolány průjezdy nákladních vlaků stejně, jako tomu bylo v případech měření na Vysočině.

Středněfrekvenční oblast $80 \div 400 \text{ Hz}$ se vyznačuje obecně vyšší úrovní zrychlení vibrací, než tomu bylo v pásmu nízkých frekvencí. V podélném směru na kolejnici lze pro upevnění W 14 považovat za významná frekvenční pásma $180 \div 220 \text{ Hz}$ a $380 \div 400 \text{ Hz}$. Druhé jmenované pásmo je význačné i pro upevnění FC I. Z hlediska velikosti amplitudového spektra se jeví oba typy upevnění jako srovnatelné. Úroveň vibrací se pohybuje v řádech desetin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Na vnějším kolejnicovém pásu je u upevnění W 14 patrný posun frekvenčních složek o cca 50 Hz výše. U FC I nic podobného vidět není. V podélném směru na pražci je situace ohledně význačných frekvenčních shluků obdobná jako na kolejnici. Velikosti amplitud se však pohybují v řádech setin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Ze srovnání konstrukcí vychází lépe upevnění FC I. Pro příčný směr lze považovat za důležité frekvence $170 \div 190 \text{ Hz}$ a $360 \div 400 \text{ Hz}$ (W 14), resp. $380 \div 400 \text{ Hz}$ (FC I). Uvedené frekvenční oblasti jsou stejné jak pro kolejnicové pásy, tak i pro pražec. Na kolejnici se pohybují amplitudy v hodnotách řádově desetin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, na pražci pak řádově v setinách $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Na kolejnici vychází méně příznivě upevnění FC I, na pražci jsou obě upevnění srovnatelná. Ve svislém směru lze na kolejnici i na pražci indikovat stejné frekvenční oblasti, jako ve směru podélném. Na kolejnici s upevněním W 14

dosahuje úroveň vibrací přibližně polovičních hodnot, než s upevněním FC I. Na pražci jsou pak hodnoty přibližně srovnatelné. Svislý směr je u upevnění FC I nejvíce dominantní, následuje směr podélný a příčný. Nejvyšší amplitudy zde dosahují až $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na kolejnici, resp. $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na pražci. Pro upevnění W 14 je v pásmu středních frekvencí dominantní směr příčný pro kolejnici (amplitudy až $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$), resp. svislý pro pražec (amplitudy až $0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Pražcové podloží nevykazuje v pásmu středních frekvencí žádná významná zrychlení. Pouze na hraně kolejového lože a zejména pak na převýšené straně lze identifikovat v celém širokém pásmu do 400 Hz amplitudy maximálně třetinové velikosti, než v oblasti nízkých frekvencí. Z porovnání nepřevýšené a převýšené strany koleje lze konstatovat, že nepatrně vyšší amplitudová spektra se vyskytují ve většině případů vně oblouku. Úroveň amplitudového spektra je na převýšené straně koleje mnohdy vyšší cca o 20 až 50 %. Také zde platí, že nejvyšší účinky vyvozují zpravidla nákladní vlaky.

V oblasti vyšších frekvencí se u obou testovaných upevnění vyskytují nejdůležitější frekvenční složky z celého hodnoceného spektra $0 \div 1000 \text{ Hz}$. Výjimku tvoří podélná zrychlení na kolejnici s upevněním W 14, kde v některých případech byly maximální složky zachyceny na frekvencích 20 Hz a 80 Hz, jak již bylo uvedeno výše. Absolutně nejvyšších amplitud však zde velmi často dosaženo není. Ve většině případů se maximální amplitudy u upevnění W 14 a v podélném směru na nepřevýšené hlavě pražce s upevněním FC I vyskytují v oblasti vysokých kmitočtů nad 1000 Hz, s maximy často kolem střední frekvence 1250 Hz. Tyto složky mají však na dynamické vlastnosti upevnění již minimální vliv. Projevují se zejména akusticky, což bude předmětem další kapitoly. Z toho důvodu jsem vysoké frekvence nad 1000 Hz podrobněji nevyhodnocoval. V podélném směru lze na kolejnici u upevnění W 14 indikovat důležitá široká frekvenční pásma $400 \div 600 \text{ Hz}$ a $800 \div 950 \text{ Hz}$, místy se blížící k horní hranici až 1000 Hz. Je zde dosaženo amplitud zrychlení vibrací až $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Zásadními oblastmi na pražci jsou pásma $400 \div 550 \text{ Hz}$, resp. $800 \div 950 \text{ Hz}$ na nepřevýšené straně. Na straně převýšené je druhá uvedená oblast rozšířena k hranici až 1000 Hz. Nejvyšší amplitudy zde dosahují hodnot až $0,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Upevnění FC I vykazuje nejvyšší úroveň vibrací na frekvencích $500 \div 700 \text{ Hz}$ a $800 \div 950 \text{ Hz}$ (kolejnice), resp. $400 \div 600 \text{ Hz}$ a $800 \div 950 \text{ Hz}$ (pražec). Amplitudy na kolejnici dosahují hodnot až $3,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, což je výrazně více, než u upevnění W 14. Na pražci jsou pak amplitudy do $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, hodnotově však srovnatelné s upevněním W 14. V příčném směru působení vykazuje upevnění W 14 zajímavou odezvu na frekvencích $400 \div 550 \text{ Hz}$ a $700 \div 950 \text{ Hz}$, přičemž na převýšené straně koleje se vyšší oblast rozšiřuje až k 1000 Hz. Na kolejnici je dosaženo maximálních amplitud $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, zatímco na pražci $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Ve srovnání s ostatními směry a oblastmi zde dochází k menšímu útlumu vibrací postupujícím z kolejnice na pražec. Pro upevnění FC I jsou důležité frekvence $500 \div 700 \text{ Hz}$ a $800 \div 950 \text{ Hz}$. Úroveň vibrací zde dosahuje hodnot do $3,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na kolejnici, resp. do $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na pražci. Ve srovnání upevnění W 14 a FC I tak tedy znovu platí, že zatímco na kolejnici vychází nepříznivě upevnění FC I, tak na pražci jsou rozdíly minimální a obě upevnění lze hodnotit z hlediska velikosti amplitudového spektra jako srovnatelná. Svislé vibrace na kolejnici s upevněním W 14 vykazují od frekvence 400 Hz prakticky trvalý nárůst amplitud až k hodnocené hranici 1000 Hz (nárůst pokračuje dále až k 1250 Hz). Amplitudy zrychlení vibrací zde dosahují při horní frekvenční hranici hodnot až $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Na pražci jsou

významné oblasti kmitočtů rozprostřeny plynule v celé hodnocené šíři spektra. Charakteristika spektra je prakticky plochá, kdy maximální amplitudy dosahují úrovně do $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Pro upevnění FC I lze za důležitá považovat pásma kmitočtů $500 \div 700 \text{ Hz}$ a $800 \div 950 \text{ Hz}$ (kolejnice), resp. $400 \div 550 \text{ Hz}$ a $600 \div 900 \text{ Hz}$ (pražec). Maximální amplitudy zde dosahují hodnot až $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na kolejnici, resp. až $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na pražci. Opět se tedy ukazuje, že na kolejnici má výrazně horší charakteristiky upevnění FC I, zatímco na pražci jsou obě upevnění srovnatelná. Tady je vhodné podotknout, že vzhledem k užší frekvenční charakteristice vychází v řadě případů upevnění FC I na pražci dokonce o něco příznivěji. Pro upevnění FC I je nejvýraznější svislý směr působení vibrací. Podélný a příčný směr lze v pásmu vyšších frekvencí považovat z hlediska maximálních amplitud za srovnatelné, a to jak na kolejnici, tak i na pražci. Upevnění W 14 vykazuje důležité hodnoty zejména ve svislém a příčném směru, přičemž podélný směr je více podružný. Z porovnání nepřevýšené a převýšené strany koleje lze konstatovat, že vyšší amplitudová spektra se vyskytují ve většině případů vně oblouku. Úroveň amplitudového spektra je na převýšené straně koleje mnohdy vyšší cca o 20 až 80 %. Nejvyšší účinky vyvozují zpravidla nákladní vlaky.

Ze všech měření a ze srovnání jednotlivých typů vozidel je patrné, že u upevnění FCI je kolejový rošt buzen rovnoměrněji na všech frekvencích. Při použití upevnění W14 je konstrukce na kolejnici výrazně buzena na vysokých frekvencích nad 1000 Hz . Výhodou upevnění W14 je, že oproti upevnění FCI nejsou na kolejnici naměřena tak vysoká amplitudová spektra. Rozdíl ve velikosti je až pětinasobný. Z hlediska velikosti amplitud se jako zásadní pro dynamické parametry u obou upevnění jeví pásmo vyšších kmitočtů $400 \div 1000 \text{ Hz}$. Vzhledem k vyšší úrovni vibrací na kolejnici lze upevnění Pandrol FC I považovat za více náchylné k rozvoji vlnkovitosti na tratích v rychlostním pásmu RP 3, které je typické pro koridorové tratě na území České republiky. Výsledky z provozního měření tak potvrzují zjištění z laboratoře, uvedená v kapitole 7.1.

Upevnění W 14 vykazuje horší schopnost tlumit vertikální vibrace o kmitočtech do 200 Hz . Přestože energie zejména vertikálních vibrací na patě kolejnice uchycené k pražci pomocí systému FC I je velmi často více než dvojnásobná, tak vlivem obecně lepších útlumových vlastností tohoto upevnění přechází přes pražec do šterkového lože energeticky srovnatelná nebo dokonce méně významná vibrační složka. Popisovaný jev je způsobený nižší dynamickou tuhostí upevnění FC I, což nejpravděpodobněji souvisí se speciální podložkou pod patu kolejnice upravenou do podoby několika řad individuálně stlačitelných válečků. Tlumící schopnosti obou upevnění výrazně stoupají s rostoucími frekvencemi nad 200 Hz . Tento trend se začíná měnit v pásmu frekvencí nad 1000 Hz , kde se útlumové vlastnosti obou upevnění opět zhoršují.

Z pohledu dynamických parametrů jsou předmětem zájmu nejen vibrace kolejového roštu, které mají vliv na kvalitu železničního svršku, ale také vibrace prostupující do širšího okolí trati. Rozvoj vibrací má na daných typech upevnění různý průběh. Útlum vibrací směrem do širšího okolí trati je efektivnější u upevnění FC I. Přesto je možné obě konstrukce považovat za stabilní a vhodné pro použití na koridorových tratích.

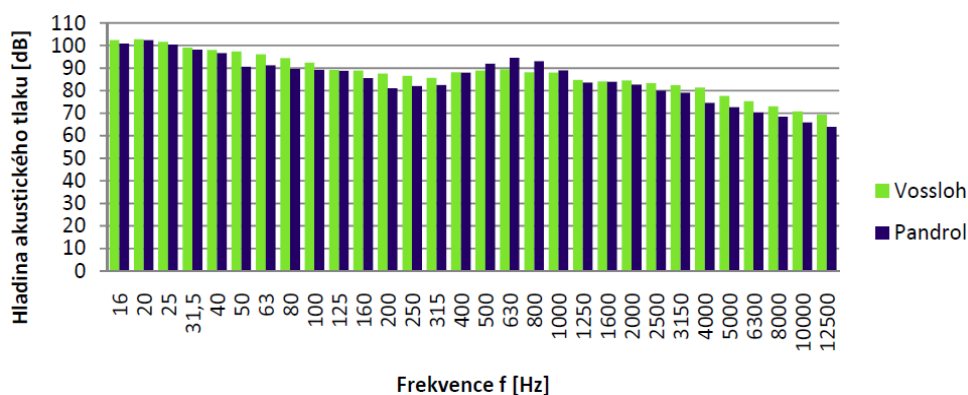
Klíčové frekvenční složky zjištěné provozním měřením u obou systémů upevnění jak na kolejnici, tak i na pražci vykazují velmi dobrou shodu s měřeními v laboratoři prováděnými za podmínek a způsobem popsáním v kapitole 7.1.

7.2.3.2.2 Frekvenční analýza akustického tlaku

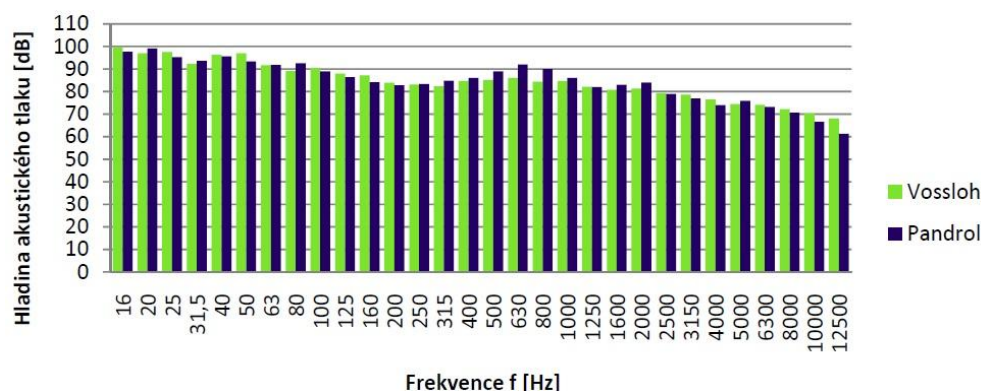
V rámci frekvenční analýzy akustického tlaku byly vyhotoveny grafy uvedené v příloze D. Provedení grafů odpovídá předchozímu vyhodnocení uvedenému v kap. 7.2.2.2.2, vyjma rozšíření podélné osy do 4 kHz. Zde je možné v některých případech zachytit zajímavé akustické děje, zejména pak v oblasti $2 \div 2,5$ kHz, která je z hlediska lidského sluchu velmi citlivá.

Pro hodnocení ve frekvenční oblasti byla zvolena metoda třetinooktávové analýzy průměrných hladin akustického tlaku. Nebyl použit žádný váhový filtr. Z výsledků v časové oblasti vyplývá, že nejvyšší hodnoty akustické odezvy jsou na snímači M2, tedy na mikrofonu na vnější straně oblouku vzdáleného 1,85 m od osy koleje. Proto jsem pro vyhodnocení hluku ve frekvenční oblasti využil signálů právě z těchto snímačů. Vyhodnocení bylo provedeno pro tři kategorie vlaků. První skupinu představují osobní vlaky, druhou pak rychlíky a vlaky vyšší kvality a poslední skupina je zastoupena vlaky nákladními.

Z obr. 7-35 a obr. 7-36 je patrné, že celkově vyšší hodnoty akustického tlaku vykazuje v kategorii osobních vlaků upevnění W 14. Rozdíly odezvy první dvojice jsou výraznější, než u druhé dvojice. Oba typy upevnění dosahují nejvyšších hodnot průměrné hladiny akustického tlaku na nejnižších frekvencích 16 Hz a 20 Hz. Vlaky z první dvojice na těchto frekvencích překračují 100 dB. Naopak nejnižší hodnoty jsou na druhém konci spektra při frekvenci 12,5 kHz. Největší rozdíly hladin akustického tlaku v neprospěch upevnění FC I jsou na frekvencích $50 \div 315$ Hz a dále na vysokých frekvencích $2 \div 12,5$ kHz. Maximální rozdíly v těchto pásmech činí 7 dB. Naopak v pásmu středních frekvencí $500 \div 1000$ Hz hlučnost upevnění FC I převyšuje upevnění W 14. Tato skutečnost je patrnější u osobních vlaků z druhé dvojice. Lidský sluch je nejcitlivější v oblasti okolo 1000 Hz. V tomto pásmu srovnávané konstrukce nevykazují velké rozdíly. Pro nejlépe slyšitelné pásmo $100 \div 5000$ Hz byly vyhotoveny energetické součty. Z tab. 7-35 lze vypočítat vyšší hodnoty u upevnění FC I. Rozdíly v hladinách akustického tlaku jsou však jen malé do 3 dB.



Obr. 7-35 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M2, osobní vlaky; Upevnění W 14, vlak č. 2, lokalita Hranice na Moravě; upevnění FC I, vlak č. 6, lokalita Napajedla; zdroj: autor

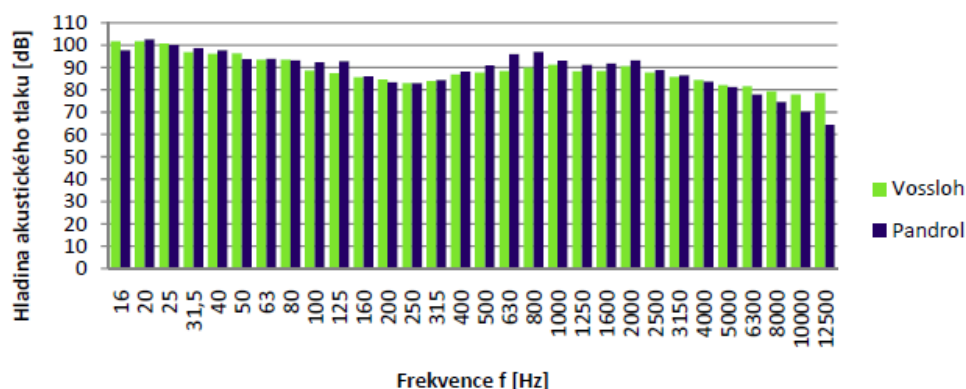


Obr. 7-36 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M2, osobní vlaky; Upevnění W 14, vlak č. 6, lokalita Hranice na Moravě; upevnění FC I, vlak č. 5, lokalita Napajedla; zdroj: autor

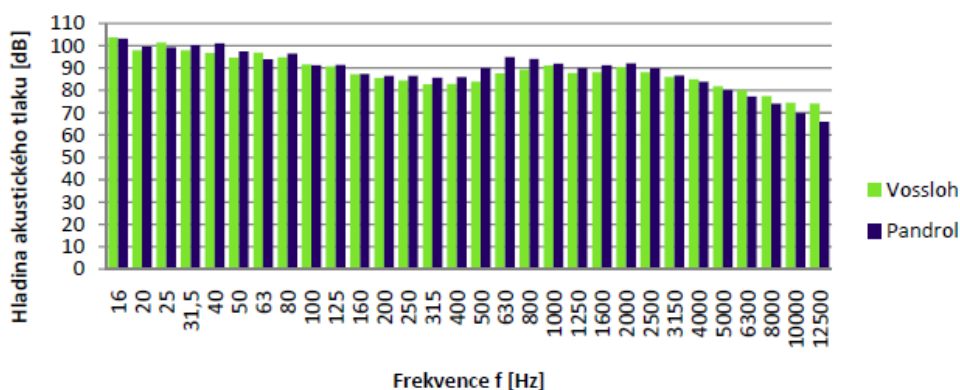
Typ upevnění (měřicí stanoviště)	Lp [dB], mikrofon M2	
	Vlak č. 2 (W 14) a vlak č. 6 (FC I)	Vlak č. 2 (W 14) a vlak č. 6 (FC I)
W 14 (Hranice na Moravě)	100	97
FC I (Napajedla)	100	99

Tab. 7-35 Energetické součty v oblasti 100 Hz až 5,0 kHz; Mikrofon M2, osobní vlaky; zdroj: autor

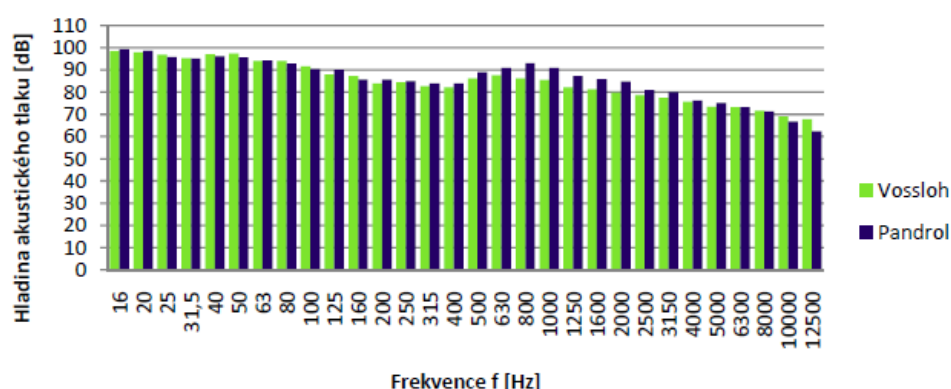
U rychlíků a vlaků vyšší kvality jsou extrémní hladiny akustického tlaku na stejných frekvencích jako u vlaků osobních. Největší odezvy tedy obě upevnění vykazují při nízkých frekvencích 16 Hz a 20 Hz. Nejnížší pak v pásmu vysokých frekvencí 10 kHz a 12,5 kHz. Z hlediska rozdílů mezi oběma konstrukcemi je výrazná frekvenční oblast 200 ÷ 3150 Hz. V tomto pásmu lze příznivěji hodnotit upevnění W 14. Upevnění FC I ve vybraných frekvencích dosahuje hodnot až o 7 dB vyšších, než srovnávané upevnění. Vyšší hodnoty u upevnění W 14 se naopak vyskytují v pásmu vysokých frekvencí 4,0 ÷ 12,5 kHz. Na frekvenci 12,5 kHz se v extrémním případě jedná o rozdíl až 14 dB. Tyto frekvence však nejsou z hlediska lidského organismu zásadní. Tab. 7-36 uvádí energetické součty vyhotovené pro nejlépe slyšitelné pásmo 100 ÷ 5000 Hz. Zde vychází méně příznivě upevnění FC I.



Obr. 7-37 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M2, rychlíky a vlaky vyšší kvality; Upevnění W 14, vlak č. 1, lokalita Hranice na Moravě; upevnění FC I, vlak č. 2, lokalita Napajedla; zdroj: autor



Obr. 7-38 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M2, rychlíky a vlaky vyšší kvality; Upevnění W 14, vlak č. 5, lokalita Hranice na Moravě; upevnění FC I, vlak č. 3, lokalita Napajedla; zdroj: autor

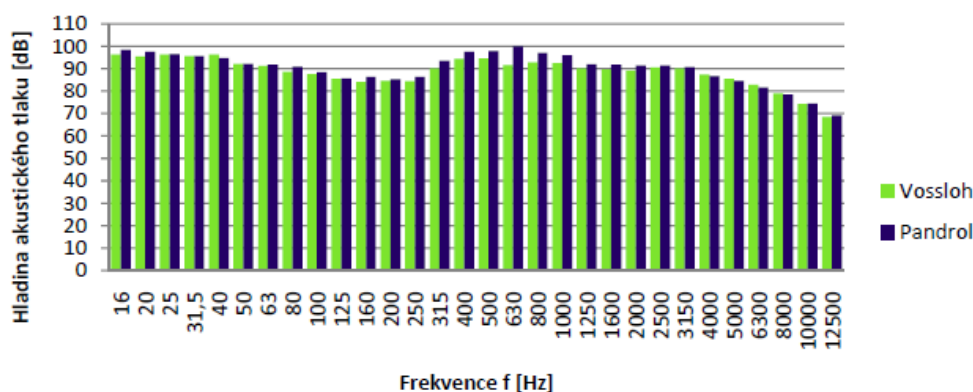


Obr. 7-39 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M2, rychlíky a vlaky vyšší kvality; Upevnění W 14, vlak č. 3, lokalita Hranice na Moravě; upevnění FC I, vlak č. 4, lokalita Napajedla; zdroj: autor

Typ upevnění (měřicí stanoviště)	Lp [dB], mikrofon M2		
	Vlak č. 1 (W 14) a vlak č. 2 (FC I)	Vlak č. 5 (W 14) a vlak č. 3 (FC I)	Vlak č. 3 (W 14) a vlak č. 4 (FC I)
W 14 (Hranice na Moravě)	100	100	98
FC I (Napajedla)	104	103	100

Tab. 7-36 Energetické součty v oblasti 100 Hz až 5,0 kHz; Mikrofon M2, rychlíky a vlaky vyšší kvality; zdroj: autor

Třetinooktávová analýza nákladních vlaků vykazuje jisté odlišnosti. Na rozdíl od vlaků osobní přepravy se nejvyšší hodnoty akustického tlaku totiž nevyskytují ve spektru nízkých frekvencí, které jsou dominantní zejména při vyšších jízdních rychlostech. U upevnění FC I se největší míra hluku projevuje na středních frekvencích 500 Hz a 630 Hz. Zde průměrné hladiny akustického tlaku dosahují hodnot až 100 dB. Upevnění W 14 má maximální hladiny akustického tlaku při kmitočtech 400 Hz a 500 Hz a dále také v pásmu nízkých frekvencí do 40 Hz. Na obr. 7-40 je patrné, že mírně hlučnější je upevnění FC I. Pro ukázkou odezvy obou konstrukcí v důležitých frekvencích 100 ÷ 5000 Hz jsem opět provedl energetické součty. Na jejich základě vykazuje horší akustické vlastnosti upevnění FC I. Rozdíl v hladinách akustického tlaku je 3 dB.



Obr. 7-40 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M2, nákladní vlaky; Upevnění W 14, vlak č. 4, lokalita Hranice na Moravě; upevnění FC I, vlak č. 1, lokalita Napajedla; zdroj: autor

Typ upevnění (měřicí stanoviště)	Lp [dB], mikrofon M2
	Vlak č. 4 (W 14) a vlak č. 1 (FC I)
W 14 (Hranice na Moravě)	103
FC I (Napajedla)	106

Tab. 7-37 Energetické součty v oblasti 100 Hz až 5,0 kHz; Mikrofon M2, nákladní vlaky; zdroj: autor

7.2.3.3 Časově-frekvenční analýza

7.2.3.3.1 Časově-frekvenční analýza zrychlení vibrací

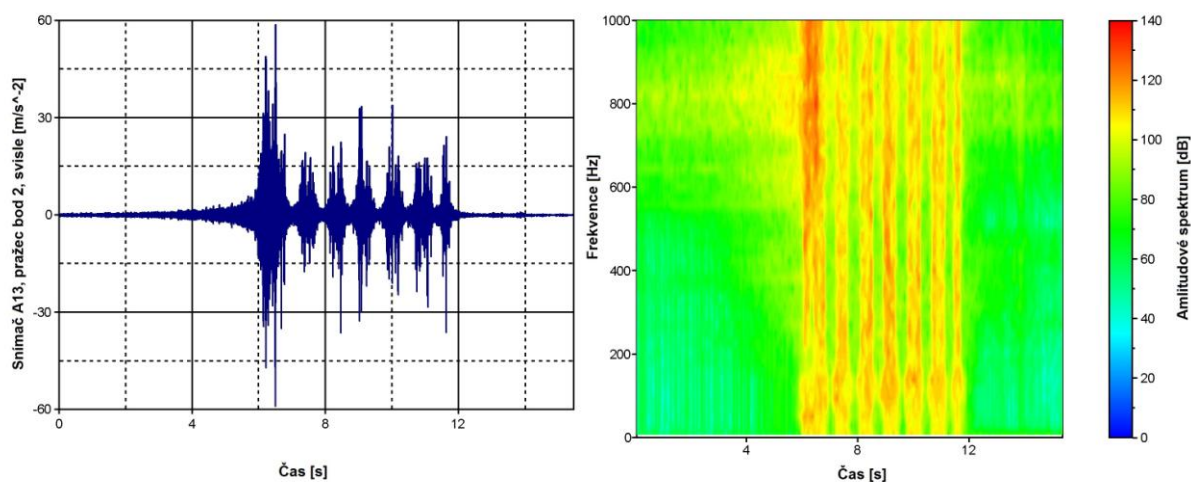
Za účelem získání komplexních informací o vlastnostech zkoušených typů upevnění je možné vyhodnocení naměřených dat rozšířit o časově-frekvenční analýzu. Jedná se o prostorovou problematiku, která umožňuje získat představu o velikosti amplitudového spektra v průřezu jednotlivých frekvencí a zároveň časovou lokalizaci těchto frekvencí. Pro účely dizertační práce byla zvolena krátkodobá Fourierova transformace STFT aplikovaná na signálu ve svislém směru z převýšené hlavy pražce A13 u vlaků vyšší kvality (vlak č. 3 v lokalitě Hranice na Moravě a vlak č. 4 v lokalitě Napajedla). Jde o transformaci, která je svými vlastnostmi výhodná pro analýzu vibračních signálů tohoto typu. Při vhodně nastavených parametrech poskytuje dostatečné rozlišení pro časovou a frekvenční lokalizaci zkoumaného jevu. Obr. 7-41 a obr. 7-42 představují dvojici navzájem svázaných grafů. Je na nich zobrazen časový průběh odezvy na dynamické zatížení (graf vlevo) a 2D hustotní spektrogram čas – frekvence – amplitudové spektrum (graf vpravo).

Barevné rozložení 2D hustotního spektrogramu názorně dokládá velmi podobné chování obou konstrukcí upevnění v pásmu nízkých frekvencí do 80 Hz. Dobře patrné jsou zvýšené účinky v čase 6,5 s na kolejovém roštu s upevněním W 14. Vzhledem k tomu, že tento jev byl patrný již na patě kolejnicového pásu, lze předpokládat, že se jedná o důsledek imperfekcí na jízdní ploše dvojkolí hnacího vozidla (lokomotiva řady 380). O vadu jízdní dráhy se zřejmě nejedná, protože daný jev by musel být patrný také na ostatních nápravách

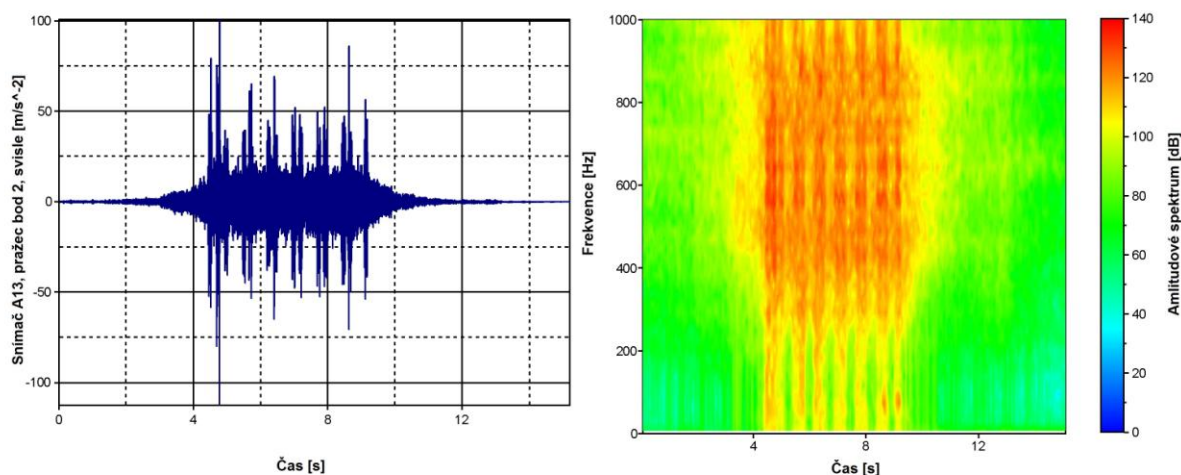
vlaku. Uvedený děj je spjatý zejména s úzkým kmitočtovým pásmem kolem 800 Hz. Zde dosahuje takových zrychlení vibrací, že výrazněji ovlivňuje rozložení amplitudového spektra a nárůst amplitud v oblasti předmětných frekvencí až o 4 dB. Lokomotiva řady 380 způsobuje obecně vyšší úroveň vibrací v pásmu $600 \div 1000$ Hz, což je odlišné od zbytku vozové skladby, kde jsou nejvýraznější složky zastoupeny na frekvencích $100 \div 150$ Hz, resp. $400 \div 600$ Hz. To je nejvíce patrné na zadním podvozku třetího vozu v čase 8,5 s. Z průběhu frekvenčního spektra zrychlení je zřejmé, že lokomotiva má na celkový tvar amplitud zásadní význam. Na pražci s upevněním FC I je nejvyšších účinků dosaženo v oblastech blízkých frekvencím 570 Hz a 650 Hz. V amplitudovém spektru bylo v uvedených oblastech dosaženo zrychlení až $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, což představuje pro tato místa poměrně vysoké hodnoty. Z 2D hustotního spektrogramu je vidět, že zvýšené hodnoty jsou na každém dvojkolí vlaku. Současně s tím je z frekvenční analýzy zřejmé, že dané frekvence byly patrné rovněž ze signálu na kolejnici. Všechny tyto aspekty napovídají o výskytu imperfekcí na pojížděné ploše vnějšího kolejnicového pásu. Současně však mohou vypovídat o specifické vlastnosti upevnění FC I, neboť zvýšené hodnoty byly zaznamenány také na nepřevýšeném kolejnicovém pásu. Z barevného rozlišení 2D hustotních spektrogramů je dobře patrné, že upevnění FC I vykazuje pro tento konkrétní případ horší dynamické vlastnosti, a to zejména na frekvencích nad 250 Hz. Při nižších frekvencích je naopak méně příznivé upevnění W 14.

Časově-frekvenční analýza tedy napomáhá uspokojivě vysvětlit vznik a původ vysokých hodnot zrychlení vibrací ve vybraných frekvenčních oblastech viditelných z frekvenční analýzy amplitudového spektra. Tento poznatek je nutné zohlednit při vzájemném porovnávání jednotlivých konstrukcí upevnění.

Dalším neméně zajímavým poznatkem je skutečnost, že v případě upevnění W 14 je na pražci dobře patrné dynamické působení jednotlivých podvozků vlakové soupravy. Oproti upevnění FC I je toto působení zachyceno v rámci širokého spektra frekvencí od těch nejnižších až do cca 250 Hz. To podporuje skutečnost, že větší dynamickou tuhost má upevnění W 14.



Obr. 7-41 Časově-frekvenční transformace STFT – snímač A13; Upevnění W 14, vlak č. 3, lokalita Hranice na Moravě; zdroj: autor



Obr. 7-42 Časově-frekvenční transformace STFT – snímač A13; Upevnění FC I, vlak č. 4, lokalita Napajedla; zdroj: autor

7.2.3.4 Shrnutí

Uskutečněná měření ukazují, jak zásadní vliv na dynamické chování koleje má technický stav a konstrukční uspořádání kolejových vozidel. Tato skutečnost je nejvíce patrná v pásmu středních frekvencí nad 300 Hz. Například taková porucha křivosti oběžné plochy kola může výrazně ovlivnit sledované dynamické parametry kolejového roštu. Velmi důležitou úlohu při odhalování takovýchto excesů hrají časově-frekvenční transformace. Pro zkoumání dynamických parametrů kolejového roštu se velice dobře osvědčila aplikovaná krátkodobá Fourierova transformace STFT doplněná o podrobnější rozbor vybraných frekvenčních a časových řezů.

Rychlost, kterou se kolejové dopravní prostředky pohybují, je významným přispěvatelem dynamického namáhání komponentů železniční tratě. Nejlépe to dokazují efektivní hodnoty RMS zrychlení vibrací. Nárůst dynamických účinků je významný zejména na nízkých frekvencích vibrací $8 \div 65$ Hz, za jejichž vznikem stojí dynamické působení podvozků kolejových vozidel, resp. jednotlivých náprav. Na vyšších frekvencích pak změna rychlosti způsobuje frekvenční posuny významných kmitočtových oblastí. Mezi velikostmi hraničních frekvencí a jízdní rychlostí přitom platí přímá úměra.

Konstrukce s upevněním FC I vykazuje větší posuny na kolejnici. Z toho vyplývá, že upevnění FC I je pružnější a umožňuje větší pohyb kolejnice v uzlu upevnění. Upevnění W 14 naopak vykazuje větší posuny na pražci, a to ve všech zkoumaných směrech. Přenáší tak více účinky zatížení z kolejnice do pražce, čímž způsobuje jeho větší výchylky.

Srovnání vibrací v časové i frekvenční rovině ukazuje na značný rozvoj vibrací na upevnění FC I. Je to způsobeno větší pružností tohoto typu uzlu upevnění, který umožňuje kolejnici v tomto uzlu kmitat. Oproti tomu upevnění W 14 je celkově tužší a neumožňuje takové kmitání kolejnice. Jeho tuhost ovšem zapříčiňuje přenos vibrací zejména na nižších frekvencích do další konstrukce, v rámci této práce tedy do pražce. Tyto extrémní hodnoty na upevnění W 14 jsou ovšem v porovnání s upevněním FC I srovnatelné. Upevnění FC I tedy vibrace tlumí na hodnoty extrému upevnění Vossloh W 14, ovšem napříč celým

měřeným rozsahem. Upevnění W 14 tedy i přes svou vyšší tuhost dostatečně omezuje přenos vibrací na pražec.

V případě upevnění FC I jsou pásma nejdůležitějších amplitud zrychlení vibrací na patě kolejnice širší než u upevnění W 14. Tyto amplitudy však nedosahují zpravidla takových hodnot jako u konkurenčního upevnění. Použití upevnění Pandrol v kolejích v oblouku by mělo být výhodnější, a to zejména z pohledu chování kolejnicového pásu v oblasti kmitočtů cca do 200 Hz. Je důvodné se rovněž domnívat, že pro konstrukci FC I charakteristický roznos dynamického zatížení v rámci širšího frekvenčního pásma a zároveň nižších amplitud zrychlení vibrací by mohl přispět k lepší odezvě kolejového svršku vůči jevům spjatým s poruchami křivosti oběžné plochy kol vlakových souprav, jež nejsou udržovány v optimálním technickém stavu.

Třetinooktávová analýza pomáhá pochopit akustický průběh na konkrétních frekvencích. U vlaků osobní přepravy se nejvyšší hodnoty akustického tlaku nacházejí na nejnižších středních frekvencích 16 Hz a 20 Hz. Naopak nejnižších hodnot je dosaženo na frekvencích 10 kHz a 12,5 kHz. V případě nákladních vlaků jsou nejvyšší hodnoty posunuty více ke středněfrekvenčnímu pásmu. Z hlediska porovnání typů upevnění nabývá FC I vyšších hodnot v pásmu středních frekvencí 500 ÷ 1000 Hz. Naopak na nízkých frekvencích a v pásmu vysokých kmitočtů vychází méně příznivě upevnění W 14. Lidský sluch je nejcitlivější na střední frekvence. Proto hodnotím jako hlučnější upevnění FC I. Rozdíly jsou ovšem velmi malé.

Obě upevnění lze hodnotit pro danou oblast použití jako stabilní. Frekvenční charakteristika uzlu upevnění FC I může přispět k rozvoji periodických vad na pojížděné ploše kolejnicových pásů.

Na základě provedených analýz je možné konstatovat, že použité metodiky poskytují dobré výsledky a závěry. Měřené a vypočítané veličiny se vyznačují dostatečnou přesností a vypovídající schopností. Ke kvalitnímu zpracování naměřených dat velmi dobře přispěly použité prostředky časové, frekvenční i časově-frekvenční signálové analýzy.

7.2.4 Lokalita Třebovice v Čechách

Cílem měření a analýz bylo sledování způsobu přenosu účinků podélného, příčného a svislého zatížení od železniční dopravy přes nosnou desku PJD a roznášecí a ochrannou vrstvu dále do konstrukcí železničního spodku a s tím související vibrace konstrukce PJD v úseku koridorové trati. Současně s tím bylo sledováno šíření hluku od železniční dopravy do prostoru podél trati. Pro účely experimentu byla vybrána konstrukce RHEDA 2000 s vysoce pružným systémem upevnění Vossloh 300. Konstrukce PJD byla následně porovnána s referenčním kolejovým roštem klasické konstrukce s kolejovým ložem s příčnými betonovými pražci B91 S/1 a s upevněním Vossloh W 14. Na základě analýzy pak mělo být rozhodnuto o vhodnosti použití testovaných systémů na koridorových tratích s ohledem na konkrétní případy a požadavky.

Měřicí profily byly situovány ve vybraných úsecích koleje č. 1 na trati č. dle knižního jízdního řádu 270 (trať Česká Třebová – Přerov – Bohumín). Jedná se o celostátní dráhu,

kteřá je v celé své délce elektrizovaná a dvoukolejná. Vybraný úsek je součástí II. a III. tranzitního železničního koridoru. Měřicí stanoviště PJD se nachází ve staničení km 9,750. Měřicí stanoviště W 14 je umístěno v km 9,430. Oba úseky leží v přímé. Podélný sklon koleje č. 1 je v daných profilech shodný -9,5 ‰ (klesá směrem k železniční stanici Zábřeh na Moravě). Trať je vedena v dvou- až třímetrovém násypu. Je navržena pro traťovou třídu zatížení D4/120. Rozsáhlá rekonstrukce trati proběhla v roce 2005, kdy byl v km 9,560 ÷ 10,000 nově zřízen zkušební úsek PJD konstrukce RHEDA 2000. Ve vzdálenosti cca 80 m od stanoviště s upevněním W 14 se nachází ve směru na Zábřeh na Moravě propustek.

Kolej v celém úseku měření je bezстыková o normálním rozchodu. Železniční svršek je tvořen kolejnicemi 60 E1. Součástí konstrukce PJD RHEDA 2000 s upevněním Vossloh 300 jsou monoblokové pražce B 355.3 U60M s rozdělením 650 mm. Součástí klasické konstrukce s kolejovým ložem jsou příčné betonové pražce B 91 S/1 s rozdělením 600 mm a s bezpodkladnicovým upevněním Vossloh W 14.

Vlastní měření v rámci lokality Třebovice v Čechách proběhlo ve dnech 24. 6. 2014, resp. 26. 6. 2014. Předmětem prvního měření byla konstrukce PJD, předmětem druhého měření pak klasická konstrukce kolejového roštu s kolejovým ložem. Meteorologické podmínky z prvního měřicího dne jsou uvedeny v tab. 7-38, z druhého dne pak v tab. 7-40. Hodnocená projetá zátěž je přehledně uvedena v tab. 7-39 (Vossloh 300), resp. v tab. 7-41 (W 14). V rámci měření byly v koleji osazeny snímače s kanálovým označením A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A17, A18, M0, M1 dle metodiky měření uvedené v kapitole 4.2. Mikrofon M1 vzdálený 7,5 m od osy koleje byl vzhledem k terénním podmínkám osazen na opačnou stranu, než je obvyklé (tj. přes přilehlou kolej). Při osové vzdálenosti kolejí 4,0 m byl tak vzdálen 3,5 m od osy koleje č. 2. Přítomnost tělesa trati do jisté míry negativně ovlivňuje výsledky měření. Protože se však jedná o srovnávací studii, kdy je u obou testovaných konstrukcí umístěn vzdálenější mikrofon stejným způsobem, nehraje tato skutečnost důležitou roli.



Obr. 7-43 Měřicí stanoviště v přímé s PJD RHEDA 2000 a s upevněním Vossloh 300, lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

Datum	Čas	Počasí	Teplota vzduchu [°C]	Teplota kolejnice [°C]		Vlhkost vzduchu [%]	Atm. tlak [hPa]	Max. vítr [m·s ⁻¹]
				Vnitřní	Vnější			
24. 6. 2014	9:40	Polojasno	25	23	24	28	986	3,5
	10:40		34	20	17	20	991	2,5
	11:40		34	23	21	20	995	1,5

Tab. 7-38 Meteorologické podmínky v den měření 24. 6. 2014 (Vossloh 300), lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

Třebovice v Čechách; 24. 6. 2014							
Pořadí	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr	Rychlost [km·h ⁻¹]	Pozn.
1	9:28	N	123+363	28	Zábřeh na Moravě	78	Postrk
2	10:08	MOs	841	-	Zábřeh na Moravě	110	-
3	11:02	R	380	8	Zábřeh na Moravě	132	-
4	11:13	SC	681	7	Zábřeh na Moravě	133	-
5	12:04	R	151	4	Zábřeh na Moravě	117	-
6	12:08	MOs	841	-	Zábřeh na Moravě	121	-

Tab. 7-39 Projeté hodnocená zátěž v den měření 24. 6. 2014 (Vossloh 300), lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor



Obr. 7-44 Měřicí stanoviště v přímé s upevněním W 14, lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

Datum	Čas	Počasí	Teplota vzduchu [°C]	Teplota kolejnice [°C]		Vlhkost vzduchu [%]	Atm. tlak [hPa]	Max. vítr [m·s ⁻¹]
				Vnitřní	Vnější			
26. 6. 2014	8:40	Oblačno	19	19	19	50	989	1,3
	9:40	Zataženo	15	11	12	67	990	1,1
	10:40		16	12	13	67	990	0,2
	11:40	Polojasno	25	24	23	44	990	0,8

*Tab. 7-40 Meteorologické podmínky v den měření 26. 6. 2014 (W 14), lokalita
Třebovice v Čechách; zdroj: autor*

Třebovice v Čechách; 26. 6. 2014							
Pořadí	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr	Rychlost [km·h ⁻¹]	Pozn.
1	8:54	N	363+150	28	Zábřeh na Moravě	72	Postrk
2	10:07	MOs	841	-	Zábřeh na Moravě	119	-
3	11:07	R	380	8	Zábřeh na Moravě	133	-
4	11:14	SC	681	7	Zábřeh na Moravě	161	-
5	12:02	R	151	4	Zábřeh na Moravě	130	-
6	12:06	MOs	841	-	Zábřeh na Moravě	120	-

*Tab. 7-41 Projetá hodnocená zátěž v den měření 26. 6. 2014 (W 14), lokalita
Třebovice v Čechách; zdroj: autor*

K práci s naměřenými signály byly opět použity programy DeweSoft, FlexPro 7.0, Microsoft Excel 2010 a VibroDiagRail.

7.2.4.1 Časová analýza

7.2.4.1.1 Časová analýza zrychlení vibrací

Časová analýza zrychlení vibrací byla standardně jako v předchozích příkladech provedena ve formě efektivních hodnot RMS [m·s⁻²], doplněných kvůli nízkým hodnotám z pražcového podloží o hladiny zrychlení vibrací L_{aef} [dB]. Ty jsou v tab. 7-42 a v tab. 7-43 uvedeny v kulatých závorkách. Před vlastní analýzou efektivních hodnot je vhodné podotknout, že v extrémních případech dosahovala maximální zrychlení na kolejnici hodnot řádově 1800 m·s⁻² (Vossloh 300), resp. 900 m·s⁻² (W 14). Na pražci se jedná o lokální maxima v řádu do 70 m·s⁻² (Vossloh 300), resp. do 260 m·s⁻² (W 14). V kolejovém loži, resp. ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje vycházejí extrémy u obou testovaných konstrukcí do 14 m·s⁻², resp. do 1,0 m·s⁻². Extrémů bylo nejčastěji dosaženo ve svislém směru. Nejmenší hodnoty pak vycházely v podélném směru, vyjma nosné desky PJD, kde byla lokální maxima naopak nejvýraznější. Pro další text budu zjednodušeně nosnou desku PJD považovat za pražec.

Efektivní hodnoty zrychlení vibrací ukazují, že u obou testovaných konstrukcí je nejvíce dominantní směr svislý, a to bez ohledu na to, zda analyzovaný signál pochází z kolejnice nebo z pražce. Na kolejnici následuje v případě PJD směr příčný a nejméně zajímavý je směr podélný. V klasickém kolejovém roštu s upevněním W 14 je naopak podélný směr na kolejnici důležitější, než směr příčný. Na pražci dochází u obou typů

upevnění k obrácení celé situace z pražce. U Vosslohu 300 převažuje směr podélný nad příčným a u upevnění W 14 směr příčný nad podélným. Uvedené skutečnosti mohou indikovat menší tuhost upevnění Vossloh 300 v příčném směru a současně menší tuhost upevnění W 14 ve směru podélném. Vychází ze zjištění nabytých v měřicích kampaních popsanych výše, kdy energie z kolejnice se vlivem nižší tuhosti upevnění vyzáří a do pražce se tak již dostává energeticky méně významná složka. Na konstrukci PJD jsou rozdíly mezi podélným a příčným směrem nízké, zpravidla do 2 dB. Na kolejnici u upevnění W 14 jsou rozdíly na kolejnici kolem 4 dB, na pražci jsou však vyšší, nejčastěji kolem 8 dB, výjimečně až 11 dB.

Porovná-li čidlo A5 umístěné v příčném směru na patě kolejnice v uzlu upevnění s čidlem A3 v ose mezipražcového prostoru, pak je zřejmý vliv obou typů upevnění na držebnost kolejnice v příčném směru. Vyšší hodnoty RMS totiž vycházejí vždy v profilu osy mezipražcového prostoru. Rozdíly jsou nejčastěji v rozmezí 2 ÷ 4 dB.

Z porovnání testovaných upevnění je patrné, že na kolejnici vycházejí vyšší hodnoty RMS u Vosslohu 300. Rozdíl je závislý na směru působení vibrací. V podélném směru se jedná nejčastěji o 4 ÷ 5 dB, v příčném směru o 8 ÷ 9 dB a ve směru svislém o 15 ÷ 16 dB, což už je opravdu markantní rozdíl. Na pražci je situace opačná. Upevnění Vossloh 300 zde vychází příznivěji. V podélném směru jsou rozdíly v efektivních hodnotách zrychlení 1 ÷ 3 dB, v příčném a svislém směru pak 9 ÷ 12 dB. Dané skutečnosti poukazují na podobné chování upevnění Vossloh 300, jaké bylo zaznamenáno u upevnění FC I. Popisovaná charakteristika vypovídá o vysoké pružnosti tohoto systému upevnění. Jaký může mít dopad zvýšené kmitání kolejnice na případné vady kolejové jízdní dráhy, se pokusím odhalit prostřednictvím frekvenční analýzy. Hodnoty z paty kolejového lože vycházejí o 3 ÷ 5 dB nižší, než hodnoty z paty roznášecí vrstvy PJD. Ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje jsou efektivní hladiny zrychlení vibrací obecně malé a z hlediska použitého typu konstrukce srovnatelné.

Měřicí bod		Upevnění Vossloh 300, efektivní hodnoty RMS [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] ([dB]), lokalita Třebovice v Čechách					
		SC 11:13 133 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	R 11:02 132 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	MOs 12:08 121 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	R 12:04 117 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	MOs 10:08 110 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	N 9:28 78 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
Bod I	A0	10 (140)	14 (143)	5 (133)	7 (137)	5 (133)	28 (149)
	A4	0,7 (117)	1 (120)	0,4 (111)	0,5 (113)	0,3 (110)	1 (121)
	A1	11 (141)	17 (145)	6 (135)	8 (138)	6 (135)	30 (150)
	A5	0,6 (116)	0,8 (118)	0,3 (110)	0,4 (112)	0,3 (110)	1 (121)
	A3	20 (146)	22 (147)	7 (137)	10 (140)	8 (138)	30 (150)
	A2	46 (153)	65 (156)	20 (146)	28 (149)	20 (146)	110 (161)
	A6	0,8 (118)	1 (120)	0,6 (116)	0,5 (114)	0,6 (116)	2 (123)
	A17	(106)	(110)	(102)	(104)	(103)	(116)
	A18	(93)	(94)	(57)	(55)	(90)	(92)

Tab. 7-42 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS; upevnění Vossloh 300; lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

Měřicí bod		Upevnění W 14, efektivní hodnoty RMS [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] ([dB]), lokalita Třebovice v Čechách					
		SC 11:14 161 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 11:07 133 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 12:02 130 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	MOs 12:06 120 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	MOs 10:07 119 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	N 8:54 72 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
Bod I	A0	6 (136)	9 (139)	4 (132)	3 (128)	4 (131)	8 (138)
	A4	0,8 (118)	1 (120)	0,5 (114)	0,4 (112)	0,8 (118)	2 (126)
	A1	5 (133)	6 (136)	3 (128)	1 (121)	2 (127)	12 (142)
	A5	2 (127)	4 (131)	1 (122)	0,6 (116)	1 (121)	5 (134)
	A3	6 (136)	8 (138)	4 (131)	2 (125)	3 (129)	19 (146)
	A2	8 (138)	12 (142)	5 (133)	3 (129)	5 (133)	18 (145)
	A6	3 (129)	5 (133)	2 (124)	1 (121)	2 (127)	8 (138)
	A17	(103)	(105)	(101)	(99)	(103)	(109)
	A18	(62)	(63)	(91)	(92)	(64)	(60)

Tab. 7-43 Efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS; upevnění W 14; lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

7.2.4.1.2 Časová analýza akustického tlaku

Pro časovou analýzu akustického tlaku byla vybrána hladina expozice průjezdu TEL [dB(A)] vážená filtrem A. Velikosti hladin akustického tlaku se v případě PJD pohybují v rozmezí 97 dB(A) až 110 dB(A) ve vzdálenosti 1,85 m od osy koleje, resp. 89 dB(A) až 101 dB(A) ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje. Hladiny akustického tlaku mají pak u upevnění W 14 hodnoty 85 dB(A) až 102 dB(A) ve vzdálenosti 1,85 m od osy koleje, resp. 89 dB(A) až 101 dB(A) ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje. Medián rozdílů hladin TEL srovnatelných kategorií vlaků je v obou případech umístění mikrofónů udán hodnotou 8 dB(A) ve prospěch upevnění W 14. Potvrzují se tak obecné předpoklady o hlučnější PJD.

Měřicí bod		Upevnění Vossloh 300, hladiny expozice průjezdu TEL [dB(A)], lokalita Třebovice v Čechách					
		SC 11:13 133 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 11:02 132 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	MOs 12:08 121 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 12:04 117 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	MOs 10:08 110 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	N 9:28 78 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
M0		102	105	97	102	99	109
M1		94	96	89	94	89	100

Tab. 7-44 Hladiny expozice průjezdu TEL; upevnění Vossloh 300; lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

Měřicí bod		Upevnění W 14, hladiny expozice průjezdu TEL [dB(A)], lokalita Třebovice v Čechách					
		SC 11:14 161 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 11:07 133 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	R 12:02 130 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	MOs 12:06 120 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	MOs 10:07 119 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	N 8:54 72 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
M0		95	95	93	93	92	102
M1		87	86	85	83	82	92

Tab. 7-45 Hladiny expozice průjezdu TEL; upevnění W 14; lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

7.2.4.2 Frekvenční analýza

7.2.4.2.1 Frekvenční analýza zrychlení vibrací

Jako součást frekvenční analýzy byly vyhotoveny grafy uvedené v příloze E. První sloupec grafů představuje časový průběh zrychlení vibrací, druhý pak amplitudové spektrum zrychlení vibrací získané rychlou Fourierovou transformací časové řady. Základní analýza byla prováděna ve třech frekvenčních oblastech v souladu s kapitolou 7.1.2.

Z časových průběhů zrychlení vibrací je ve všech měřených místech a směrech na první pohled dobře patrná vozová skladba vlaků na klasické konstrukci kolejového roštu ve šterkovém loži. V případě PJD je identifikace jednotlivých náprav a podvozků složitější, přičemž pak v podélném směru prakticky nemožná. Maximální hodnoty zrychlení jsou uvedeny v kapitole 7.2.4.1.1.

V nízkofrekvenčním pásmu je úroveň vibrací obecně velmi nízká. Vůči vyhodnocovanému spektru jsou zajímavé hodnoty dosaženy pouze u paty kolejového lože (resp. roznášecí vrstvy PJD) a ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje. Zde lze hovořit o důležitých frekvencích 20 Hz a 60 ÷ 80 Hz. Amplitudová spektra vycházejí velmi proměnlivě v maximálních hodnotách pohybujících se v řádu tisícín $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ na bližším stanovišti a v řádu tisícín až deseti tisícín $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje. U upevnění W 14 se jedná o nejvyšší amplitudy z celého měřeného spektra v pražcovém podloží, u upevnění Vossloh 300 jsou pak na patě roznášecí vrstvy dosažena maxima ve středněfrekvenčním pásmu 200 ÷ 650 Hz. Na kolejovém roštu a na konstrukci PJD jsou významné frekvence 20 ÷ 50 Hz a 80 Hz, a to ve všech směrech působení vibrací. První frekvenční shluk je projevem působení podvozků projíždějících vozidel a druhá frekvence je součástí účinků dvojkolí. Maxima se však pro tento případ pohybují vzhledem ke zvýšeným jízdním rychlostem za hranicí nízkofrekvenční oblasti se špičkou kolem 100 Hz. V podélném směru na kolejnici dosahují maximální amplitudy hodnot do 0,03 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, přičemž u upevnění W 14 jsou obecně cca poloviční. Na pražci se vyskytují amplitudy do 0,05 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, přičemž méně příznivě se jeví upevnění W 14. Přestože maxima jsou v tomto případě vyšší na pražci, v globálním měřítku je patrný útlum vibrací vlivem upevnění a hodnoty na pražci jsou obecně nižší, než na kolejnici. V příčném směru dosahují amplitudy na kolejnici hodnot do 0,07 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, na pražci pak do 0,03 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Vyšší zrychlení na kolejnici jsou zaznamenána v ose mezipražcového prostoru, čímž se opět potvrzuje dobrá drážebnost testovaných uzlů upevnění. Z porovnání obou konstrukcí vychází na kolejnici příznivěji W 14, na pražci je pak situace opačná. Svislý směr je pak u obou upevnění nejvíce dominantní. Na kolejnici jsou maximální amplitudy do 0,2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ a na pražci do 0,05 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Vibrace na kolejnici jsou opět příznivější pro W 14 a vibrace na pražci pro Vossloh 300 tak, jako v předchozích dvou směrech. U obou upevnění je patrný posun složek dynamického působení podvozků směrem k nižším frekvencím. Je rovněž patrný nízký útlum na frekvenci 20 Hz pro upevnění W 14. Amplitudy na pražci jsou v tomto případě často srovnatelné a v ojedinělých případech i vyšší, než na kolejnici.

V pásmu středních frekvencí 80 ÷ 400 Hz se nachází již celá řada dominantních amplitudových oblastí. Vyskytují se na kolejnici v příčném a ve svislém směru u obou typů

upevnění, na pražci ve všech směrech působení u Vosslohu 300, resp. v podélném a svislém směru u upevnění W 14. Dominantní je rovněž část případů při patě roznášecí vrstvy PJD. V podélném směru na kolejnici lze zmínit široké pásmo $170 \div 400$ Hz. Amplitudy zde dosahují hodnot až $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (W 14), resp. až $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (Vossloh 300) a jejich průběh má dva základní rysy. V případě krátkých vozidel, mezi které patří motorové vozy řady 841, je průběh spektra prakticky plochý. V případě ostatních vlaků se amplitudy plynule zvyšují spolu s rostoucími frekvencemi. Výjimku tvoří nákladní vlak a rychlíky u upevnění Vossloh 300, kde se maximální amplitudy objevují při frekvenci cca 330 Hz a dále pak drží konstantní hodnotu. Na pražci lze pozorovat obdobné chování jako na kolejnici s tím rozdílem, že dochází k přirozenému poklesu začátku spektra na $100 \div 400$ Hz. Maximální amplitudy se zde pohybují nejčastěji v řádu setin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Zatímco na kolejnici vychází upevnění Vossloh 300 hůře, na pražci je tomu právě naopak. V příčném směru je u upevnění W 14 zajímavá frekvence $80 \div 120$ Hz. Amplitudy zde dosahují hodnot v řádu setin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Jedná se o rozšířené pásmo, ve kterém se díky vyšší traťové rychlosti projevují nápravy měřených vozidel nad rámec nízkofrekvenčního spektra. U krátkých souprav je důležité pásmo $170 \div 220$ Hz s amplitudami na kolejnici do $0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, resp. do max. $0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na pražci. Delší soupravy se vyznačují trvale rostoucími amplitudami se zvyšujícími se frekvencemi v pásmu $220 \div 400$ Hz. Zde se pak vyskytují amplitudy až $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na kolejnici a až $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na pražci. Na konstrukci PJD lze vyzdvihnout široké pásmo $100 \div 400$ Hz. Také zde dochází k plynulému růstu zrychlení vibrací vzhledem k rostoucím frekvencím. Maximální amplitudy dosahují hodnot až $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na kolejnici a až $0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na pražci. Porovná-li obě testované konstrukce, pak je možné vyslovit stejné závěry, jako v případě podélného směru. Vibrace na kolejnici jsou nižší u upevnění W 14, zatímco na pražci vykazuje výhodnější charakteristiku upevnění Vossloh 300. Z pohledu velikosti amplitudového spektra je u obou typů upevnění nejzásadnější svislý směr. Také zde je patrný nárůst amplitud zrychlení vibrací v závislosti na jejich frekvenci, včetně zastavení růstu při dosažení kmitočtu cca 330 Hz u PJD. Jedná se o široké pásmo frekvencí $150 \div 400$ Hz. Pro upevnění W 14 je pak toto pásmo doplněno navíc frekvencemi $80 \div 120$ Hz jako pokračování nízkofrekvenčních špiček. Ve druhé zmiňované oblasti se úroveň vibrací pohybuje do $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na kolejnici, resp. do $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na pražci. Celkově lze nalézt maximální amplitudy na kolejnici do $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (W 14), resp. do $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (Vossloh 300). Na pražci jsou pak maximální amplitudy do $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (W 14), resp. do $0,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (Vossloh 300). Při patě kolejového lože, příp. roznášecí vrstvy PJD jsou nejdůležitější frekvence v oblastech $120 \div 180$ Hz a $220 \div 280$ Hz (W 14), resp. $150 \div 400$ Hz (Vossloh 300). Zrychlení vibrací zde dosahují úrovně v řádech tisícín $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ (W 14) až setin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ (Vossloh 300). Ve vzdálenosti 7,5 m od osy pak většina zajímavých amplitud nepřesahuje kmitočty 150 Hz. Úroveň zrychlení vibrací je zde značně proměnlivá. Řádově se jedná o desetitisíciny až tisíciny $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Ve svislém směru na kolejnici a při patě kolejového lože, příp. roznášecí vrstvy PJD vychází méně příznivě upevnění Vossloh 300, na pražci je pak horší upevnění W 14. Ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje lze hodnotit obě konstrukce jako srovnatelné.

V oblasti vyšších frekvencí se u obou testovaných upevnění vyskytují nejdůležitější frekvenční složky z celého hodnoceného spektra $0 \div 1000$ Hz. Dominantní zrychlení jsou dosažena ve všech směrech působení na kolejnici, a to u obou upevnění. V podélném směru to

platí bezvýznamu, ve směru příčném a svislém lze u některých vlaků nalézt maxima ve středněfrekvenční oblasti, jak již bylo uvedeno výše. Na pražci jsou často maxima dosažena v podélném a příčném směru u PJD a výhradně v příčném a částečně i ve svislém směru u upevnění W 14. Většina vlaků má rovněž dominantní vyšší frekvence při patě roznášecí vrstvy PJD. V podélném směru na kolejnici s upevněním W 14 hodnotím jako zásadní pásma $450 \div 600$ Hz a $700(800) \div 900(1000)$ Hz. Šíře a hranice druhého frekvenčního pásma jsou variabilní zejména v závislosti na jízdní rychlosti. Maximální amplitudy se pohybují zpravidla do $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, přestože absolutně nejvyšší zrychlení jsou zaznamenána v oblasti vysokých frekvencí $1100 \div 1250$ Hz. Takto vysoké frekvence však již spíše než s dynamikou souvisejí s akustickými jevy. Z toho důvodu nebyly frekvence nad $1,0$ kHz podrobněji vyhodnocovány. U PJD jsou na kolejnici důležitá kmitočtová pásma $400 \div 600$ Hz a $700(800) \div 900(1000)$ Hz, také zde v závislosti na rychlosti. Maxima dosahují hodnot až $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Na pražci jsou u upevnění W 14 významná kmitočtová pásma $400 \div 550$ Hz, resp. $800 \div 1000$ Hz. Hodnoty zrychlení se pohybují v řádech setin $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ a dosahují maxima až $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. U delších souprav dochází ke slynutí obou oblastí v jednu s trvale klesajícím trendem amplitud. Frekvenční složky na pražci u Vosslohu 300 kopírují ty z kolejnice. Maximální amplitudy dosahují úrovně do $0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. V příčném směru se vyskytují na kolejnici stěžejní frekvence nejčastěji v pásmech $400 \div 750$ Hz a $800 \div 950$ Hz (W 14), resp. $400 \div 650$ Hz a $700(800) \div 900(1000)$ Hz (Vossloh 300). Maximální zrychlení dosahují hodnot $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (W 14), resp. $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (Vossloh 300). Je vhodné podotknout, že v případě měřicího místa v ose mezipražcového prostoru se nejedná o maximální úroveň vibrací. Té je dosaženo ve vysokofrekvenční oblasti $1800 \div 2000$ Hz, která však již jen nepřímo souvisí s dynamickými vlastnostmi trati, a proto nebyla podrobněji hodnocena. Na pražci se výrazná příčná zrychlení vyskytují na kmitočtech $450 \div 500$ Hz a $600 \div 1000$ Hz (W 14), resp. $400 \div 600$ Hz a $750(800) \div 950(1000)$ Hz (Vossloh 300). Amplitudy dosahují u W 14 hodnot max. $0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, u Vosslohu 300 pak max. $0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Svislý směr je u obou typů upevnění nejzásadnější. Na kolejnici jsou pro upevnění W 14 rozhodující frekvence $400 \div 700$ Hz a $800 \div 1000$ Hz. Amplitudy zde dosahují hodnot do $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, přičemž se v řadě případů nejedná o nejvyšší hodnoty spektra. Ty bývají v některých případech posunuty za hranici hodnocené oblasti k frekvencím $1100 \div 1250$ Hz. Hlavní frekvence na pražci kopírují ty z kolejnice, přičemž amplitudy dosahují úrovně do $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. U PJD se důležité amplitudy na kolejnici až $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ vyskytují ve frekvenčních oblastech $400 \div 550$ Hz a $600 \div 700(900)$ Hz. Situace na pražci je přitom obdobná s tím rozdílem, že maximální amplitudy mají hodnoty do $0,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Překvapivě vysoké hodnoty zrychlení vibrací až $0,025 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ se vyskytují na frekvencích $400 \div 650$ Hz při patě nosné vrstvy PJD. Může za to s největší pravděpodobností odlišná struktura nosné vrstvy od kolejového lože. Nosná vrstva je vytvořena stabilizací hydraulickými pojivy. Pro její zřízení byla použita výhradně betonová směs z drceného přírodního kameniva frakce $0 \div 22(32)$ mm. Beton třídy C 30/37 musel splňovat základní orientační pevnost v rozmezí $5000 \div 10000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. V ostatních případech již nebyla v pásmu vyšších frekvencí zaznamenána žádná důležitá zrychlení v pražcovém podloží. Srovnání konstrukcí koresponduje se zjištěními z nízkofrekvenční, resp. středněfrekvenční analýzy. Na kolejnici vychází méně příznivě

upevnění Vossloh 300, zatímco na pražci je tomu právě naopak. V pražcovém podloží vychází hůře PJD, zejména s ohledem na tuhou nosnou vrstvu HGT.

Výhodou upevnění W14 je, obdobně jako při srovnání s FC I, že oproti upevnění Vossloh 300 nejsou na kolejnici naměřena tak vysoká amplitudová spektra. Rozdíl ve velikosti je až šestinásobný. Z hlediska velikosti amplitud se jako zásadní pro dynamické parametry u obou upevnění jeví pásmo vyšších kmitočtů $400 \div 1000$ Hz. Vzhledem k vyšší úrovni vibrací na kolejnici, lze upevnění Vossloh 300 považovat za více náchylné k rozvoji vlnkovitosti na tratích v rychlostním pásmu RP 3, které je typické pro koridorové tratě na území České republiky.

Z pohledu dynamických parametrů jsou předmětem zájmu nejen vibrace kolejového roštu, které mají vliv na kvalitu železničního svršku, ale také vibrace prostupující do širšího okolí trati. Rozvoj vibrací má na daných typech upevnění různý průběh. Útlum vibrací směrem do širšího okolí trati je však u obou konstrukcí srovnatelný.

V oblasti blízké frekvenci cca 520 Hz působí podélná zrychlení, která svými amplitudami výrazně převyšují okolní kmitočty. Daný jev se vyskytuje pouze u motorových osobních vozů řady 841. Zejména v případě W 14 se jedná o velmi ostře ohraničenou oblast, která svědčí o skutečnosti, že zkoumaná vlastnost nesouvisí s konstrukcí upevnění, neboť v žádném jiném případě v terénu ani v laboratoři nic podobného zjištěno nebylo. Z časového průběhu zrychlení vibrací a ze známých vlastností traťového a přejezdového zabezpečovacího zařízení je zřejmé, že původcem této odezvy je právě projíždějící motorový vůz řady 841. Po konzultaci s odborníky na kolejová vozidla (Ing. Jan Vašků a Ing. Karel Peška, Výzkumný ústav železniční, a.s.) bylo usouzeno, že se velmi pravděpodobně jedná o harmonickou frekvenci rozptylového magnetického pole trakčního motoru. Při uvažované maximální rychlosti vozidla $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ by tak v kombinaci extrémních podmínek (frekventované používání vozidla a maximální výkon trakčních motorů) mohlo docházet u tužších typů upevnění k rozvoji vlnkovitosti o vlnové délce cca 65 mm. Protože však daný jev přímo nesouvisí s upevněními kolejnic, ve výše popsané frekvenční analýze jsem s ním neuvažoval.

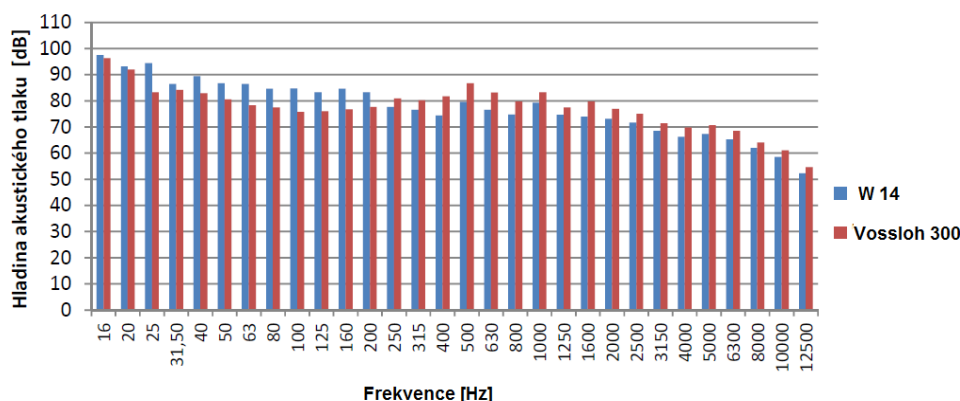
Ve srovnání s předešlými měřeními na Vysočině, resp. u Hranic na Moravě a u Napajedel vychází lokalita Třebovice v Čechách nejpříznivěji, přestože provozovaná doprava je zde jednoznačně nejrychlejší. To může být zapříčiněno několika skutečnostmi. Především je zájmový měřicí úsek udržován ve velmi dobrém technickém stavu. Současně s tím jsou na něm velmi často provozovány moderní elektrické i motorové jednotky. Kolej je navíc v daném úseku vedena v přímé, čímž nedochází k zvýšenému namáhání železničního svršku vlivem nárůstu sil na styku kolo – kolejnice při průjezdu vozidla obloukem. Znovu se tedy potvrzuje, že jízdní rychlost je pouze jedním z několika aspektů, které ovlivňují velikost dynamických účinků na trať. Na základě uvedených skutečností je možné pro dané provozní podmínky považovat obě testované konstrukce za stabilní a vhodné pro použití na koridorových tratích.

7.2.4.2.2 Frekvenční analýza akustického tlaku

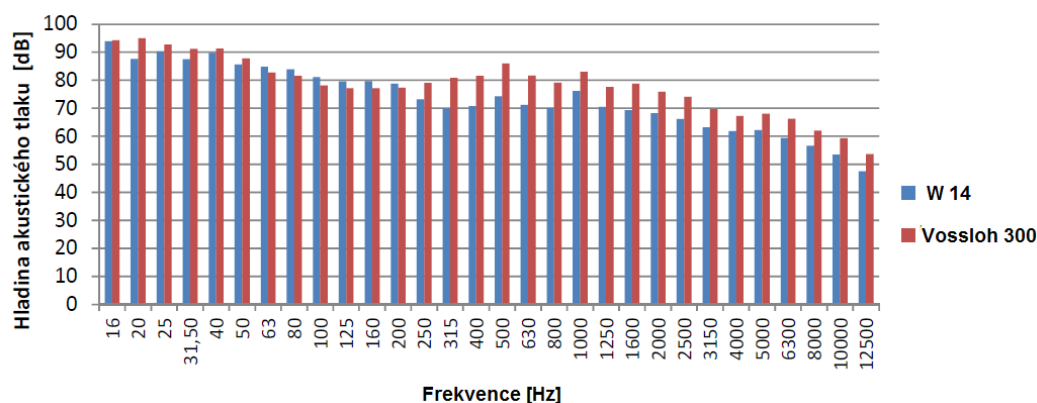
V rámci frekvenční analýzy akustického tlaku byly vyhotoveny grafy uvedené v příloze E. Provedení grafů odpovídá předchozímu vyhodnocení uvedenému v kap. 7.2.2.2.2.

Pro hodnocení ve frekvenční oblasti byla zvolena metoda třetinooktávové analýzy průměrných hladin akustického tlaku. Nebyl použit žádný váhový filtr. Z výsledků v časové oblasti vyplývá, že nejvyšší hodnoty akustické odezvy jsou na snímači M0, tedy na mikrofону vzdáleném 1,85 m od osy koleje. Proto jsem pro vyhodnocení hluku ve frekvenční oblasti využil signálů právě z těchto snímačů. Vyhodnocení bylo provedeno pro tři kategorie vlaků. První skupinu představují osobní vlaky, druhou pak rychlíky a vlaky vyšší kvality a poslední skupina je zastoupena vlaky nákladními.

Z analýzy osobních vlaků (obr. 7-45 a obr. 7-46) vyplývá, že vyšší hladiny akustického tlaku vykazuje PJD. Grafy třetinooktávových pásem naznačují, že zatímco na frekvencích do 200 Hz lze nalézt vyšší hladiny u upevnění W 14, na vyšších kmitočtech již dominuje výhradně upevnění Vossloh 300. Frekvenční pásmo $16 \div 50$ Hz vykazuje proměnlivé výsledky. Nízkofrekvenční pásma bývají nejvíce náchylná na povětrnostní podmínky panující v době měření, a také na rozdílné jízdní rychlosti měřených vozidel. Oba typy upevnění dosahují nejvyšších hodnot průměrné hladiny akustického tlaku na nejnižší frekvenci 16 Hz. Vlaky na této frekvenci výrazně překračují hladinu 90 dB. Naopak nejnižší hodnoty jsou dosaženy na druhém konci spektra při frekvenci 12,5 kHz. U upevnění W 14 lze říci, že se zvyšujícími se frekvencemi hladiny akustického tlaku trvale klesají, s malými výjimkami v pásmu $500 \div 1000$ Hz, kde hodnoty převážně stagnují. U upevnění Vossloh 300 hladiny akustického tlaku nejprve klesají, aby pak na frekvencích $250 \div 1000$ Hz začaly znovu stoupat. Lidský sluch je nejcitlivější v oblasti okolo 1000 Hz. V tomto pásmu dosahuje vyšší odezvy PJD. Rozdíl činí cca 5 dB. Pro nejlépe slyšitelné pásmo $100 \div 5000$ Hz byly vyhotoveny také energetické součty. Z tab. 7-46 lze vypočítat vyšší hodnoty u upevnění Vossloh 300. Rozdíly v hladinách akustického tlaku jsou při zohlednění různých jízdních rychlostí vlaků č. 2 poměrně vysoké $3 \div 5$ dB.



Obr. 7-45 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofón M0, osobní vlaky; Upevnění W 14, vlak č. 2; upevnění Vossloh 300, vlak č. 2; lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

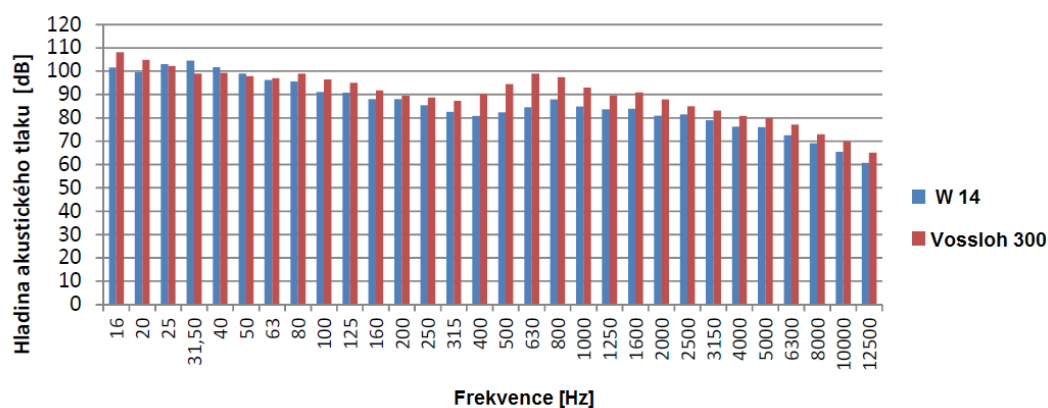


Obr. 7-46 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M0, osobní vlaky; Upevnění W 14, vlak č. 6; upevnění Vossloh 300, vlak č. 6; lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

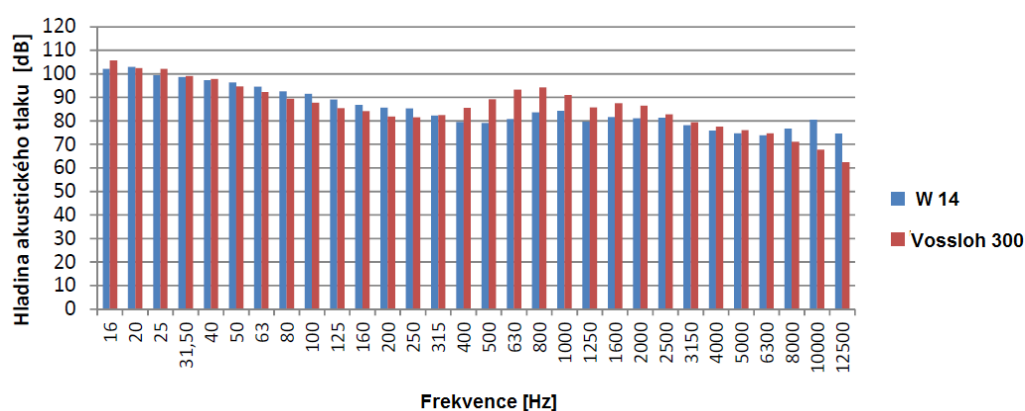
Typ upevnění (měřicí stanoviště)	Lp [dB], mikrofon M0	
	Vlaky č. 2	Vlaky č. 6
W 14 (Třebovice v Čechách)	92	87
Vossloh 300 (Třebovice v Čechách)	93	92

Tab. 7-46 Energetické součty v oblasti 100 Hz až 5,0 kHz; Mikrofon M0, osobní vlaky; zdroj: autor

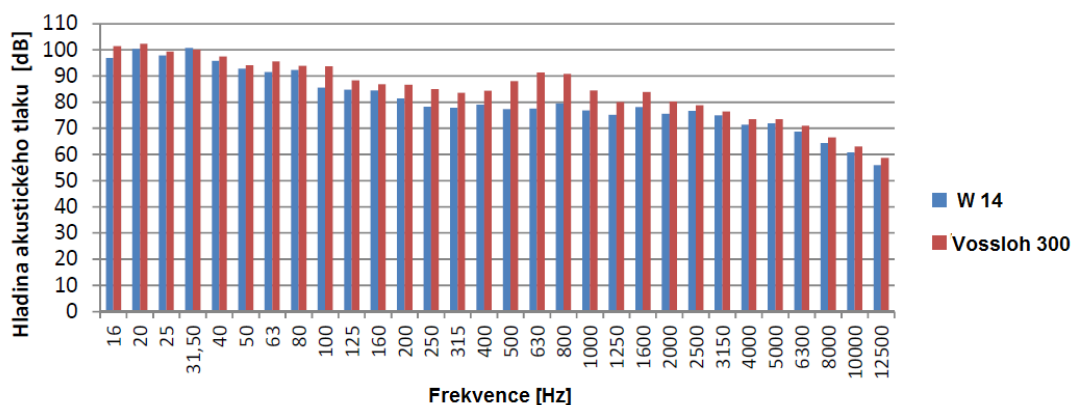
U rychlíků a vlaků vyšší kvality jsou extrémní hladiny akustického tlaku na stejných frekvencích jako u vlaků osobních. Největší odezvy tedy obě upevnění vykazují při nízkých frekvencích 16 Hz a 20 Hz. Hladiny akustického tlaku zde zpravidla překračují hranici 100 dB. Nejnížší odezvy jsou pak v pásmu vysokých frekvencí kolem 12,5 kHz. Z hlediska rozdílů mezi oběma konstrukcemi je výrazná frekvenční oblast 400 ÷ 1000 Hz. Zde jsou obecně rozdíly mezi oběma konstrukcemi cca 10 dB v neprospěch PJD. Na ostatních frekvencích nejsou již rozdíly natolik významné. Odlišné chování vykazuje pouze dvojice vlaků č. 4, kde upevnění W 14 dosahuje vyšších hladin akustického tlaku v pásmu frekvencí 50 ÷ 250 Hz a 8,0 ÷ 12,5 kHz. Na frekvencích 10,0 ÷ 12,5 kHz se v extrémním případě jedná o rozdíl až 12 dB. Tyto frekvence však nejsou z hlediska lidského organismu zásadní. Je rovněž vhodné podotknout, že daný výsledek může souviset s rozdílnými jízdními rychlostmi měřených souprav SC Pendolino, kdy souprava na klasické konstrukci s kolejovým ložem byla výrazně rychlejší. Tab. 7-47 uvádí energetické součty vyhotovené pro nejlépe slyšitelné pásmo 100 ÷ 5000 Hz. Vyšší součtové hladiny zde vycházejí vždy u upevnění Vossloh 300. Rozdíly v hladinách činí při zohlednění rozdílných jízdních rychlostí dvojice vlaků č. 4 přibližně 5 ÷ 7 dB.



Obr. 7-47 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M0, rychlíky a vlaky vyšší kvality; Upevnění W 14, vlak č. 3; upevnění Vossloh 300, vlak č. 3; lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor



Obr. 7-48 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M0, rychlíky a vlaky vyšší kvality; Upevnění W 14, vlak č. 4; upevnění Vossloh 300, vlak č. 4; lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

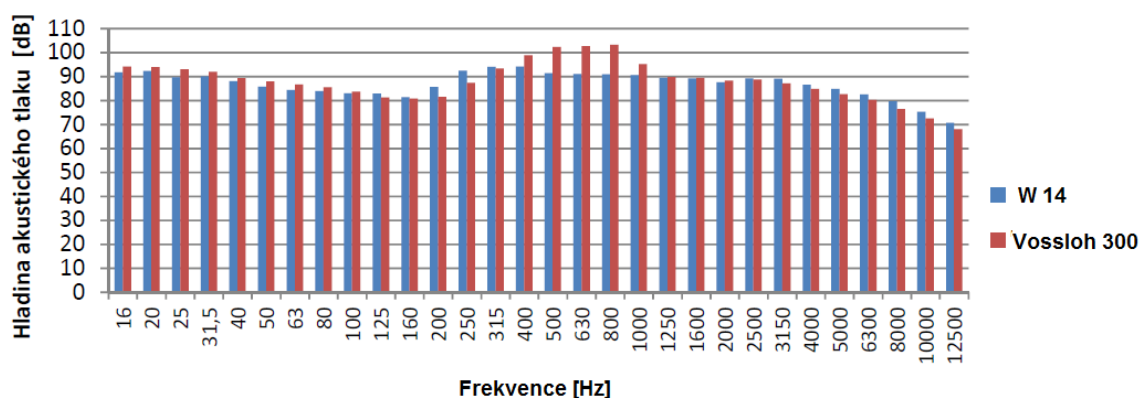


Obr. 7-49 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M0, rychlíky a vlaky vyšší kvality; Upevnění W 14, vlak č. 5; upevnění Vossloh 300, vlak č. 5; lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

Typ upevnění (měřicí stanoviště)	Lp [dB], mikrofon M0		
	Vlaky č. 3	Vlaky č. 4	Vlaky č. 5
W 14 (Třebovice v Čechách)	98	97	92
Vossloh 300 (Třebovice v Čechách)	105	100	99

Tab. 7-47 Energetické součty v oblasti 100 Hz až 5,0 kHz; Mikrofon M0, rychlíky a vlaky vyšší kvality; zdroj: autor

Třetinooktávová analýza nákladních vlaků vykazuje jisté odlišnosti. Na rozdíl od vlaků osobní přepravy se nejvyšší hodnoty akustického tlaku totiž nevyskytují ve spektru nízkých frekvencí, které jsou dominantní zejména při vyšších jízdních rychlostech. U upevnění Vossloh 300 se největší míra hluku projevuje na středních frekvencích 400 ÷ 1000 Hz, tedy pro lidský sluch v nejcitlivějším pásmu. Zde průměrné hladiny akustického tlaku dosahují hodnot až 102 dB. Upevnění W 14 má maximální hladiny akustického tlaku při kmitočtech 315 ÷ 500 Hz a dále také v pásmu nízkých frekvencí do 40 Hz. Na obr. 7-50 je patrné, že hlučnější je upevnění Vossloh 300. Pro ukázkou odezvy obou konstrukcí v důležitých frekvencích 100 ÷ 5000 Hz jsem opět provedl energetické součty. Na jejich základě vykazuje horší akustické vlastnosti PJD. Rozdíl v hladinách akustického tlaku je 7 dB.



Obr. 7-50 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M0, nákladní vlaky; Upevnění W 14, vlak č. 1; upevnění Vossloh 300, vlak č. 1; lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

Typ upevnění (měřicí stanoviště)	Lp [dB], mikrofon M0
	Vlaky č. 1
W 14 (Hranice na Moravě)	102
FC I (Napajedla)	109

Tab. 7-48 Energetické součty v oblasti 100 Hz až 5,0 kHz; Mikrofon M0, nákladní vlaky; zdroj: autor

7.2.4.3 Shrnutí

Provedená měření a analýzy potvrzují významný vliv technického stavu a uspořádání kolejových vozidel na akustické a dynamické parametry trati. Potvrzují rovněž zásadní vliv jízdní rychlosti měřených vozidel, jakož i stavu železničního svršku a spodku.

Z analýzy vyplývá, že trať s klasickou konstrukcí kolejového roštu usazeného do šterkového lože má na všech frekvencích do 1000 Hz rovnoměrnější odezvu na dynamické zatížení. Amplitudová spektra na kolejnici byla vždy, mnohdy až šestinásobně, vyšší u konstrukce PJD. Jako zásadní se zde jeví frekvenční pásmo $400 \div 1000$ Hz. Upevnění Vossloh 300 tak může být více náchylné k rozvoji vlnkovitosti při uvažování standardních rychlostí pro koridorové tratě $120 \div 160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Naopak na pražci vycházelo méně příznivě upevnění W 14. Příznivější dynamické vlastnosti PJD na pražci souvisejí jednak s nižší tuhostí upevnění Vossloh 300, a jednak se samotnou konstrukcí PJD RHEDA 2000. U této konstrukce jsou totiž kolejnicové podpory zmonolitněny do nosné betonové desky spočívající na homogenní roznášecí vrstvě HGT. To vede k vyšší stabilitě konstrukce železničního svršku. Při patě kolejového lože, resp. nosné vrstvy HGT je zachycena vyšší úroveň zrychlení vibrací u PJD. Tato zrychlení se pak frekvenčně značně odlišují od ostatních typů hodnocených upevnění, neboť namísto nízkofrekvenčních složek se vyskytují v pásmu $200 \div 650$ Hz. To souvisí s odlišnou strukturou nosné vrstvy PJD oproti běžnému kolejovému loži. Přes odlišný průběh vibrací testovanými konstrukcemi lze zrychlení vibrací zachycená ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje považovat za srovnatelná.

Ke zkoumání akustických parametrů železničních konstrukcí dochází zejména za účelem ochrany lidského zdraví před negativními účinky hluku z železniční dopravy. Je známou skutečností, že lidský sluch je nejvíce citlivý v oblastech cca 500 Hz až 5,0 Hz. A právě v této oblasti vychází konstrukce PJD méně příznivě, a to jak ve vzdálenosti 1,85 m od osy koleje, tak i ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje. Rozdíly v součtových hladinách akustického tlaku činí na bližším stanovišti v průměru 5 dB a na vzdálenějším stanovišti v průměru dokonce 7 dB.

Na základě provedených analýz je možné konstatovat, že použité metodiky poskytují dobré výsledky a závěry. Měřené a vypočítané veličiny se vyznačují dostatečnou přesností a vypovídající schopností. Porovnání dynamických a akustických parametrů upevnění W 14 s výsledky z lokality u Hranic na Moravě, resp. s výsledky laboratorních testů navíc prokázalo dobrou opakovatelnost zvolené metodiky měření.

7.3 Stanovení nejistot měření

Termín nejistota měření je definován jako parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptýlení hodnot, jež mohou být odůvodněně přisuzovány k měřené veličině [100]. V praxi to znamená, že nejistota měření představuje interval okolo odhadu měřené veličiny, ve kterém se nachází skutečná (konvenčně pravá) hodnota měřené veličiny s určitou pravděpodobností.

Při určování a vyhodnocování nejistot se vychází z teorie pravděpodobnosti a statistiky. Naměřené hodnoty a zejména pak jejich chyby mají určité rozdělení pravděpodobnosti. Z toho důvodu se využívají statistické metody pro vyhodnocování nejistot. Využívají se však také metody, které se statistikou nesouvisí. Pokud je nejistota vyhodnocována pomocí statistických metod na základě naměřených hodnot, jedná o nejistotu vyhodnocenou postupem A. Odhad měřené veličiny x bývá nejčastěji nahrazen aritmetickým průměrem \bar{x} ze souboru naměřených hodnot. Jsou-li známy korekční faktory, je velmi žádoucí tento

soubor naměřených hodnot zkorigovat. Korekce spočívá v odstranění všech známých systematických vlivů měření, díky kterému se podstatně snižuje výsledná nejistota. Standardní nejistota $u_A(x)$ se určí jako výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru $s(\bar{x})$. Pokud se použije jiný způsob vyhodnocení, než pomocí statistiky, jedná se o nejistotu vyhodnocenou postupem B. Standardní nejistoty u_B ovlivňují vlastní měření. Je nutné je předem analyzovat a zahrnout do výpočtu (pokud nejsou zanedbatelné). Informace o těchto nejistotách lze čerpat z údajů od výrobce měřicí techniky. V těch bývá uvedena např. třída přesnosti, chyby měření, apod. Dalším důležitým zdrojem jsou údaje z kalibračních protokolů, zkušenosti získané předchozími měřeními a zkušenosti z praxe, znalost vlastností a chování materiálů aj. Při stanovování standardních nejistot typu B je velmi důležitá dobrá orientace v problematice zákona rozdělení. V praxi se nejčastěji využívá normální a rovnoměrné rozdělení doplněné v některých aplikacích také o bimodální (Diracovo) rozdělení.

Pro určení nejistoty veličiny, která je matematickou funkcí jiných veličin, je nutné použít tzv. zákon šíření nejistot. Pokud je výstupní veličina Y dána funkcí několika vstupních veličin X_i :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (7-2)$$

a

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (7-3)$$

jsou odhady výstupní veličiny Y , resp. vstupních veličin X_i , pak zákon šíření nejistot má tvar:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i), \quad (7-4)$$

kde A_i jsou součinitele citlivosti:

$$A_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_m)}{\partial x_i}. \quad (7-5)$$

U nepřímých měření, kde jsou měřené veličiny vzájemně závislé, je velmi důležité zohlednit vzájemné vazby mezi měřenými veličinami prostřednictvím tzv. kovariancí. Ty mohou mít často na výsledek větší vliv, než základní složky nejistot u_A a u_B . Kovariance se zanedbávají v případech, kdy by měly za následek celkové snížení výsledné nejistoty. Zákon šíření nejistot (7-4) nabývá v případě korelovaných veličin podoby:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=2}^m \sum_{j<i}^{m-1} A_i A_j u(x_{i,j}), \quad (7-6)$$

kde $u(x_{i,j})$ je kovariance nejistoty mezi korelovanými veličinami x_i a x_j a platí:

$$u(x_{i,j}) = r(x_{i,j}) u(x_i) u(x_j), \quad (7-7)$$

kde $r(x_{i,j})$ je tzv. výběrový korelační koeficient. Ten stanovuje stupeň závislosti mezi veličinami x_i a x_j a nabývá hodnot od -1 do 1.

Kombinace standardních nejistot u_A a u_B pomocí součtu čtverců udává standardní kombinovanou nejistotu:

$$u_C(y) = \sqrt{u_A^2(y) + u_B^2(y)} . \quad (7-8)$$

Standardní kombinovaná nejistota u_C pokrývá skutečnou hodnotu s pravděpodobností cca 66 %. V technické praxi se běžně uvádí rozšířená nejistota měření U :

$$U = k \cdot u_C , \quad (7-9)$$

která v případě dosazení koeficientu rozšíření $k = 2$ zvýší výslednou pravděpodobnost pokrytí na cca 95 %.

7.3.1 Vyjádření nejistot měření posunů

Vyjádření nejistot měření posunů indukčnostními snímači bylo provedeno v souladu s normou [100]. Hlavní zdroje nejistot je možné vyjádřit obdobným způsobem, jako v případě vibrodiagnostiky popsané v kapitole 7.3.2. Je zřejmé, že zásadního významu zde nabývá uchycení snímače magnetickým držákem k plovoucímu vztažnému bodu, tj. k ocelovému rámu instalovanému do kolejového lože. Princip metodiky je založen na měření relativních, nikoli absolutních posunů. Rozdíly mezi výsledky přímého měření relativních posunů a dvojitou integrací zrychlení (tedy hledáním absolutních posunů) vycházely dle uskutečněných pokusů cca 10 %. To má zásadní vliv na hodnotu rozšířené nejistoty měření vůči absolutním posunům, viz horní řádek tab. 7-49. Pro účely mého měření ale není tato vyšší nejistota rozhodující. Prováděná měření byla totiž srovnávací. Testované konstrukce byly vůči sobě hodnoceny na základě relativních posunů. Z toho důvodu je možné vliv plovoucího vztažného bodu z analýzy nejistot vypustit, čímž se rozšířená nejistota měření v relativním zápisu sníží na cca ± 5 %. Je vhodné podotknout, že rozšířená nejistota uvedená v tab. 7-49 je součinem standardní kombinované nejistoty a koeficientu rozšíření $k = 2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %.

Typ analýzy	Zápis rozšířené nejistoty měření	Rozšířená nejistota měření $U(x)$ pro $k = 2$
Časová analýza (absolutní posuny)	Relativní	± 21 %
Časová analýza (relativní posuny)	Relativní	± 5 %

Tab. 7-49 Rozšířené nejistoty měření – analýza posunů; zdroj: autor

7.3.2 Vyjádření nejistot měření vibrací

Pro vyjádření nejistot měření ve vibrodiagnostice neexistuje konkrétní předpis. Nejistoty je potřeba odhadnout na základě dobré znalosti výše popsané problematiky. Důležitou částí této problematiky jsou zdroje nejistot. Jsou to všechny vlivy, které mohou ovlivnit výslednou nejistotu a tím i výsledek měření. Vezmu-li do úvahy zjednodušený měřicí řetězec znázorněný na obr. 5-1, pak základními zdroji nejistot ve vibrodiagnostice jsou:

- snímač (umístění snímače na sledovaném objektu a přesnost nasměrování citlivé osy snímače, způsob upevnění, převodní charakteristiky, kolísání citlivosti, chyby kalibrace a vliv okolí, především teploty);
- filtr a předzesilovač (nepřesnosti zesilovače, nepřesnosti filtrů a oken);
- A/D převodník (nepřesnosti A/D převodníku – chyba nuly, chyba zesílení, nelinearita, chyba kvantizace, referenční napětí, vliv prostředí na komponenty zajišťující přenos a zpracování signálu – teplota, elektromagnetické pole, apod.).

Nad rámec schématu je nutné uvažovat ještě nejistoty dané vyhodnocovacím zařízením a zobrazovací jednotkou. U analogových zobrazovacích zařízení je chyba daná jedním dílkem stupnice, u digitálních přístrojů pak jedním digitem, tzn. nejmenší zobrazenou číslicí. Ve vyhodnocení signálu hraje velmi důležitou roli frekvenční rovina. Dosavadní výzkumy poukazují, jak značný vliv má na výslednou nejistotu měření právě analyzátor. Pro koeficient rozšíření $k = 2$ vychází při zohlednění maximálních negativních vlivů rozšířená nejistota měření U v relativním zápisu blízka 50 %. Tato hodnota je samozřejmě nepřijatelná. V technické praxi je však možné vliv analyzátoru zanedbat. Je to dáno zejména tím, že se v současnosti již výhradně jedná o průmyslová zařízení s odzkoušenými funkcemi, vyráběná v precizních podmínkách a na základě dlouhodobých zkušeností výrobců. Druhým předpokladem je, že analyzátory obsluhuje zaškolený a dostatečně zkušený personál.

V reálných podmínkách měření je tedy potřeba věnovat největší pozornost kalibraci měřicích cest a zařízení a hlavně umístění a uchycení snímače na testovaném objektu. Výsledné vlivy jsou jen těžko odhadnutelné, ale lze předpokládat, že při nedodržení obecných zásad měření by se výsledná rozšířená nejistota měření mohla pohybovat v relacích 50 % až 100 %. Je tedy zřejmé, že celé měření by tak bylo zcela znehodnoceno. Tab. 7-50 zachycuje rozšířené nejistoty měření pro konkrétní typy vibrodiagnostiky, získané na základě zkoušek [101] a se zohledněním normy ČSN ISO 10864-1 [102]. Uvedené rozšířené nejistoty jsou součinem standardní kombinované nejistoty a koeficientu rozšíření $k = 2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %.

Typ analýzy	Zápis rozšířené nejistoty měření	Rozšířená nejistota měření $U(x)$ pro $k = 2$
Buzení rázovým kladivem - frekvenční analýza	Relativní	$\pm 4 \%$
Buzení elektrodynamickým budičem - frekvenční analýza	Relativní	$\pm 4 \%$
Buzení provozem - časová, frekvenční i časově-frekvenční analýza	Relativní	$\pm 3,0 \%$

Tab. 7-50 Rozšířené nejistoty měření – vibrodiagnostika; zdroj: autor

7.3.2 Vyjádření nejistot měření hluku

Pro vyjádření nejistot měření akustických veličin v mimopracovním prostředí existuje metodický pokyn [103]. Problematika je řešena také normou ČSN ISO 1996-2 [104]. Do výpočtu výsledné nejistoty jsou zahrnuty následující zdroje nejistot:

- měřicí řetězec vč. kalibrace (v ČSN ISO 1996-2 vyjádřen hodnotou standardní nejistoty 1,0 dB);
- metoda měření;
- nejistota určená z opakovaných měření za podmínek opakovatelnosti (stejná metoda, měřicí řetězec, měřič a místo měření);
- zbytkový dozvuk;
- meteorologické podmínky.

Nejistoty způsobené provozními podmínkami a zbytkovým dozvukem byly zanedbány. U všech měření uvažuji dostatečný počet naměřených vlaků různých kategorií při srovnatelných provozních a technických podmínkách. Nejistotu způsobenou zbytkovým dozvukem bylo možné zanedbat, neboť při všech měřeních byly dodržovány podmínky ohledně hluku pozadí uvedené v kapitole 4.2.5.6 pro rozdíl mezi hladinou od vozidla a hladinou pozadí větší, než 10 dB. Zbylé zdroje nejistot byly vyhodnoceny na základě doporučení výše uvedených předpisů. Tab. 7-51 vždy obsahuje méně příznivou variantu. Uvedené rozšířené nejistoty jsou součinem standardní kombinované nejistoty a koeficientu rozšíření $k = 2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %.

Typ analýzy	Zápis rozšířené nejistoty měření	Rozšířená nejistota měření $U(x)$ pro $k = 2$
Časová analýza - expozice průjezdu TEL	Absolutní	$\pm 3,6$ dB
Frekvenční analýza - FFT, třetinooktávová analýza, energetické sčítání průměrných hladin akustického tlaku	Relativní	± 5 %

Tab. 7-51 Rozšířené nejistoty měření – analýza hluku; zdroj: autor

8. Doplnění a vylepšení měřicí aparatury

Zkušenosti s prováděním laboratorních zkoušek a měření in-situ s sebou přinesly celou řadu potřeb týkajících se doplnění měřické aparatury. Následující odstavce uvádějí výčet opatření, kterým doposud nebyla v textu práce věnována dostatečná pozornost. Tato zlepšení byla v průběhu provádění měření postupně aplikována, odzkoušena a připravena k dalšímu použití. Současně s tím jsou nastíněny možnosti vhodného doplnění, příp. zjednodušení měřících postupů.

Měření si vyžádala celou řadu drobných investic. Aby bylo možné při laboratorním testování přenosových funkcí systému měnit utahovací moment vrtule upevnění, bylo nezbytné pořídit momentový klíč včetně speciálních nástrčných hlavic pro upevnění Vossloh. Měření in-situ si zase vyžádala nákup telefonního přístroje GSM-R včetně aktivace a měsíčních poplatků za provoz SIM karty. Bylo to z důvodu zajištění bezpečnosti na odlehlých místech trati s dálkovým řízením z centrálního dispečerského stanoviště. Před nákupem zařízení bylo střežení měřícího stanoviště zajišťováno přes správce infrastruktury prostřednictvím dohod o provedení práce. Tento způsob byl však organizačně i finančně poměrně náročný. Měření akustických parametrů si zase vyžádala pořízení tří nových stativů a redukci pro uchycení různých typů čidel a zařízení. Nejdelší ze stativů je možné vysunout až do výšky přesahující 7 m nad terénem. Spolu se stativy bylo vyrobeno i několik prodlužovacích závitových tyčí délky 0,5 m. S jejich použitím se dala výška stativu zvýšit až na hranici atakující 8 m, aniž by byla porušena stabilita stativu. Pro určování požadované výšky mikrofону se velmi dobře osvědčil nový laserový dálkoměr s kamerovým výstupem na displeji.

V rámci určování dynamických vlastností při výběru vhodných úseků měření již bude k dispozici přístroj pro měření drsnosti, který byl ÚŽKS pořízen v rámci vybavení výzkumného centra AdMaS (Advanced Materials, Structures and Technologies). Pro stanovení stupně dynamického útlumu TDR metodou Pass-by-Analysis je v současné době v závěrečném schvalovacím procesu nový technický předpis CEN/TR 16891. Předpis uvádí dvě metody určení TDR. Obě vycházejí z analýzy zrychlení vibrací běžného provozu na trati. První je založena na iterační metodě energetického obsahu záznamu průjezdu celé soupravy v poměru k jedné její zvolené nápravě. Přes třetinooktávová pásma je vypočítán poměr energetického obsahu každého pásma. Hodnota TDR je pak stanovena z délky vlaku a z poměru energetického obsahu vybrané nápravy. Je speciálně upravená váhovým koeficientem, který zohledňuje také vliv ostatních náprav soupravy. Váhový koeficient je získán iteračním postupem přes hodnoty útlumového exponentu, přičemž dostačujících je obvykle pět iterací, než se útlumový exponent zcela ustálí. Druhá metoda je založena na určování sklonu časového záznamu zrychlení vibrací. Na rozdíl od iterační metody nezohledňuje vliv jiných náprav, pouze analyzovaných. Tato metoda je navíc náchylná na odhad místa, ve kterém bude směrnice záznamu zjišťována. Výsledný TDR se z obou metod určuje průměrováním alespoň tří průjezdů vozidel. Pokud se výsledky v libovolném třetinooktávovém pásmu liší o více než 5 dB, je takový záznam odstraněn. Posuzování TDR metodami Pass-by-Analysis s sebou přináší zejména tu výhodu, že není nutné používat rázové

kladívko. Současně s tím není potřeba vyznačit přesně definované řezy, ve kterých jsou prováděny údery. Metody Pass-by-Analysis mají zajistit úsporu času a snížit požadavky na přístrojové vybavení a pobyt pracovníků v provozované koleji. Po uvedení předpisu CEN/TR 16891 v platnost doporučují nahradit stanovení TDR prostřednictvím rázového kladívka iterační metodou Pass-by-Analysis. Ne každý subjekt tímto vysoce specifickým a relativně nákladným vybavením disponuje. Zatímco buzení rázovým kladívkem musí být zajištěno minimálně dvěma aktivními pracovníky, metodu Pass-by-Analysis zvládne zkušený pracovník samostatně. Dodatečné požadavky na střežení pracoviště tím nejsou dotčeny.

Zajímavou alternativou k buzení konstrukcí rázovým kladivem je použití vibračního motoru. Vibromotorem je možné vybudit vyšší účinky na nižších frekvencích, které jsou zásadní z hlediska analýzy kvality podepření pražců. Tím by se mohla výsledná dynamická tuhost vybudovaná vibromotorem přiblížit více k hodnotám získávaným diagnostickými prostředky popsány v kapitole 6.4. Byl pořízen třífázový vibrační motor včetně frekvenčního měniče. Výkon motoru je 550 W s maximálními otáčkami 2800 ot·min⁻¹. Vibrace jsou buzeny pomocí rotujících nevývažků. Vibrační síla motoru je až 7,7 kN. K řízení otáček slouží frekvenční měnič s napětím 1 x 230 V a s frekvenčním rozsahem 0,5 ÷ 200 Hz. K uchycení vibrátoru na pražec byl navržen a vyroben speciální přípravek. Vibrátor je přišroubován k desce spočívající na hlavě pražce. Deska je ve své poloze fixována přes táhla uchycená o patu kolejnice, viz obr. 8-1. Ve svislé části desky se navíc nachází otvor s utahovacím šroubem umožňujícím přichycení desky k čelu pražce. Systém je navržen tak, aby umožňoval měření v provozované koleji. Vibromotor doporučují použít pro stanovení kvality podepření pražců všude tam, kde je potřeba vybudit větší silové účinky, než prostřednictvím rázového kladiva. Jedná se například o výhybkové pražce či jiné speciální konstrukce, jakými jsou např. prvková mostovka apod. Je zřejmé, že v takovém případě by bylo nezbytné stanovit jiné postupy zpracování signálu a jiné podmínky přijetí, než jsou uvedeny v kapitole 6.4.1.2 pro rázové kladivo.



Obr. 8-1 Instalace vibračního motoru na pražec; zdroj: autor

Další možností je buzení kuličkou. Princip spočívá v pouštění ocelové kuličky z předem definované výšky na temeno kolejnice. Kulička vybudí v kolejnici vibrace, jež jsou charakteristické svým širokým frekvenčním rozsahem až 6,0 kHz a rychlým útlumem. Doba trvání rázu je cca 50 ms, tedy přibližně polovina, než při buzení rázovým kladivem. Velkou výhodou buzení tímto způsobem je skutečnost, že není k měření potřeba žádná speciální budicí aparatura. Jistou nevýhodou je, že není známá vstupní budicí síla. Porovnatelné podmínky měření jsou zajišťovány konstantní dopadovou výškou. V mých pokusech byla zvolena výška $v = 350$ mm. Při této konfiguraci kulička vyvoluje v kolejnici dostatečná zrychlení a současně není problém s odhadem a nastavením polohy kuličky tak, aby vždy trefila temeno kolejnice. Průměr mnou použité kuličky byl $d = 15$ mm, hustota materiálu oceli $\rho = 7000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a hmotnost kuličky $m = 13,8$ g. Kulička byla spouštěna ze zapínacího magnetického držáku, viz obr. 8-2. Buzení kuličkou je možné použít jako jednodušší variantu k rázovému kladívku. Díky širokému frekvenčnímu spektru, jež kulička dokáže vybudit, je tato metoda buzení výborná zejména pro analýzu akustických parametrů konstrukcí. Také je vhodná pro buzení vibrací, neboť svým širokým pracovním rozsahem zpravidla pokrývá vlastní frekvence konstrukce. Díky specifickému časovému průběhu je kulička vhodným nástrojem ke stanovení útlumových charakteristik testované konstrukce. Vzhledem k neznámé vstupní síle a k malým budicím účinkům není tato metoda vhodná ke stanovení kvality podepření pražců.



Obr. 8-2 Buzení kuličkou; zdroj: autor

V rámci měření byl optimalizován přípravek pro vytvoření vztažného srovnávacího bodu pro měření posunů. Místo rámu sestávajícího ze dvou ocelových tyčí zatlučených do kolejového lože a ocelového nosníku připevněného k oběma tyčím, byla použita jen jedna tyč délky 800 mm a průměru 20 mm. Tyč se zatlouká do kolejového lože. K této tyči byl navržen a následně vyroben speciální držák pro fixaci snímače dráhy. Nové řešení se ukázalo

jako stabilnější. Instalace snímačů dráhy se navíc výrazně urychlila. Tím se rozšířila možnost použití metodiky měření pohybového chování konstrukce i do míst, kde to nebylo z hlediska bezpečnosti dříve možné, např. do nepřehledných úseků v oblouku na vytižených tratích, do kolejových rozvětvení a křížení apod. Nový způsob upevnění snímače je vidět na obr. 8-3.

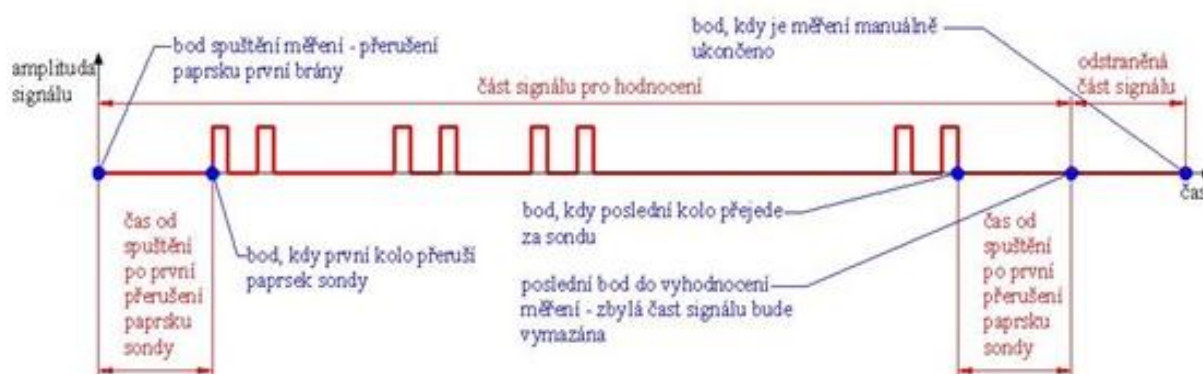


Obr. 8-3 Fixace indukčního snímače posunů; zdroj: [70]

Metodiku měření je možné doplnit o spouštěcí mechanismus, který zajistí totožné spuštění záznamu u všech vlaků a ve stejném řezu. Mechanismus je možné modifikovat o fotoelektrickou sondu schopnou identifikovat jednotlivá kola vlaku v měřicím profilu. Vhodným spouštěcím mechanismem mohou být například světelné brány. První světelná brána může být umístěna 25 m před měřeným profilem ve výšce cca 1,5 m nad temenem kolejnice. Po přerušení paprsku světelné brány kolejovým vozidlem bude měření spuštěno jak na všech snímačích, tak i na fotoelektrické sondě. Druhá světelná brána bude umístěna 25 m za měřeným profilem. Jakmile vlak dosáhne druhé světelné brány, měření bude i nadále pokračovat. Nicméně z rozdílu času, za který vozidlo ujelo 50 m, bude možné velmi přesně spočítat rychlost vlaku. Měření bude vypnuto manuálně poté, co poslední vůz vlaku bezpečně mine druhou světelnou bránu. V měřeném profilu bude za pomoci fotoelektrické sondy, jejíž paprsek bude nastaven asi 2 mm nad temenem kolejnice, možné identifikovat jednotlivá kola vlaku. Schéma měřicího stanoviště a rozmístění světelných bran jsou patrné z obr. 8-4. Obr. 8-5 znázorňuje výběr části signálu pro hodnocení. Uvedené řešení, mimo jiné, usnadní stanovení časového výřezu pro výpočet hladiny expozice průjezdu TEL, resp. pro výpočet efektivní hodnoty RMS.

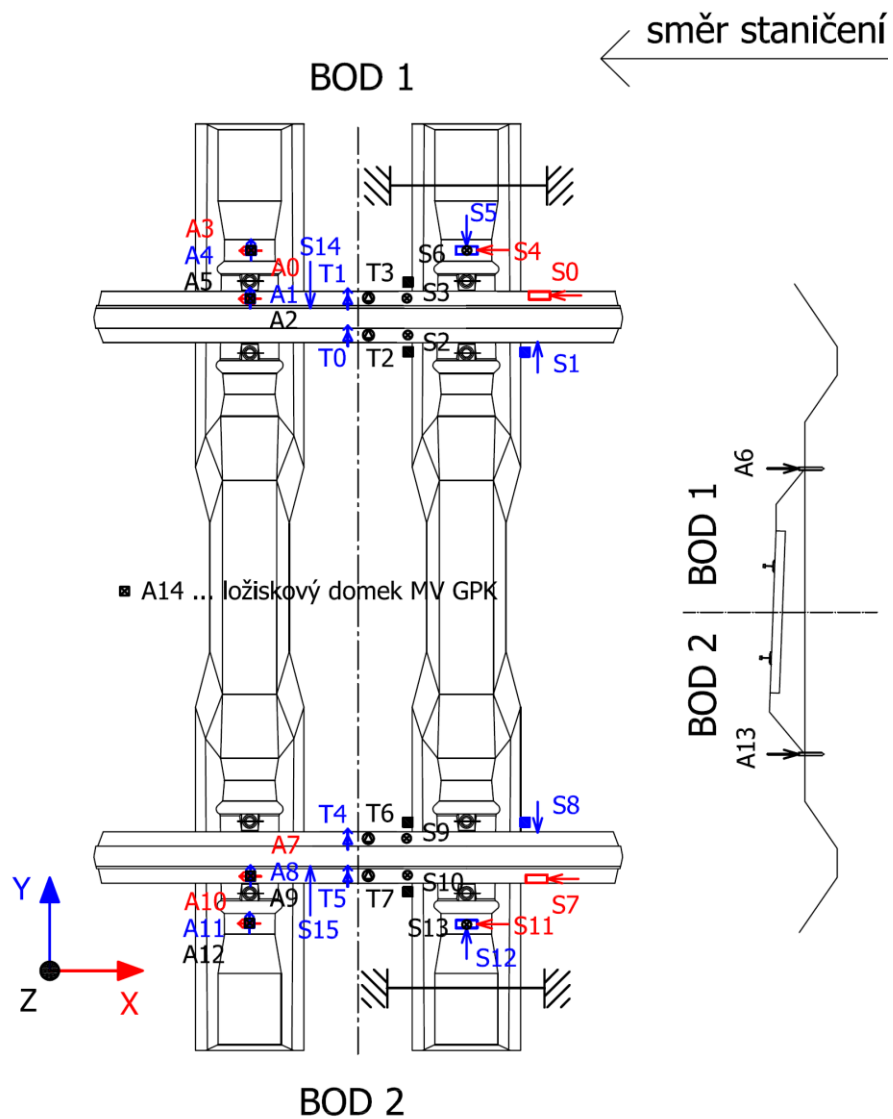


Obr. 8-4 Schéma měřicího stanoviště; zdroj: autor



Obr. 8-5 Výběr části signálu pro hodnocení; zdroj: autor

Je všeobecně známo, že se zvyšující se jízdní rychlosti kolejové dopravy dochází také k nárůstu dynamických účinků. Tato hypotéza byla ostatně potvrzena v rámci měření při nízkých rychlostech do $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ v lokalitě Počátky-Žirovnice, viz kapitola 7.2.2.1.2. Pro vývoj měřicího zařízení určeného k trvalé instalaci do tělesa tratě je však důležité objasnit, zda a jakým způsobem závisí změna rychlosti na posunu amplitud zrychlení vibrací ve frekvenčním spektru. Pro účely experimentu tohoto typu je nezbytné zajistit, aby testovaným úsekem projíždělo stejné vozidlo opakovaně různými rychlostmi. Těchto podmínek lze docílit na zkušebním železničním okruhu Výzkumného ústavu železničního, a.s. v Cerhenicích. Při této příležitosti by byl zkušební úsek, vyjma standardního použití akcelerometrů a indukčnostních snímačů, osazen rovněž odporovými tenzometry. Tenzometry by byly umístěny na patu obou kolejnicových pásů do osy mezipražcového prostoru. Předpokládané schéma umístění snímačů je na obr. 8-6. Přetvoření paty kolejnicového pásu lze v těchto místech očekávat nejvýraznější. Toto umístění je vhodné také z důvodu kalibrace tenzometrů v příčném směru hydraulickou panenkou, resp. ve svislém směru stojící lokomotivou. Snímače by určovaly odezvu na silové působení jedoucího železničního vozidla, tedy konkrétně přetvoření paty kolejnice. Zpětně by bylo přepočítáno napětí a velikost dynamické kolové síly $Q_{max,lim}$ a vodicích sil Y a ΣY . Ze získaných výsledků by bylo možné orientačně stanovit bezpečnostně-kritické mezní hodnoty pro vykolejení resp. pro posunutí kolejového roštu a určit jejich závislost na rychlosti. Hodnoty by mohly posloužit ke srovnání s výstupy z měrného dvojkolí (dvojkolí, které umožňuje kontinuální záznam s průměrováním hodnot po 2 m). Na dané téma byl podaný projekt SŽDC „Verifikace prostředků pro měření GPK“ č. S 23733/2015-SŽDC-O8, který se však nakonec navzdory posunutí termínu plnění nepodařilo realizovat.



Obr. 8-6 Příklad metodiky měření pro objasnění vlivu rychlosti; zdroj: autor

9. Závěry a doporučení

V letech 2007 až 2015 bylo celkem uskutečněno více než třicet rozsáhlých měření. Měření byla zacílena jednak na zjišťování dynamicko-akustických parametrů kolejnicových upevnění v laboratoři nebo in-situ a jednak na výběr vhodné lokality pro experimentální analýzu v terénu. Řada měření byla provedena z podnětu správce dopravní cesty, příp. z podnětu výrobců nebo distributorů součástí železničního svršku. Přínosem této rozsáhlé a troufnu si poznamenat, že v měřítku České republiky i naprosto ojedinělé, činnosti byla řada dat a nových poznatků ohledně chování různých typů kolejnicových upevnění. Jmenovitě se jednalo o upevnění určená pro instalaci na betonové pražce Vossloh W14, W 14NT, E 14, W 21NT, W 28NT, Pandrol FC I a pružné podkladnicové upevnění KS. Dále bylo ověřováno upevnění pro ocelové Y pražce S 15 a systém Vossloh 300 určený pro PJD. Upevnění W 21NT bylo v době realizace měření ve stádiu provozního ověřování v rámci systému péče o kvalitu. Upevnění W 28NT se provozně ověřuje dodnes, byť v trochu jiné konfiguraci.

Celkově se ukázalo, že podobná měření je velmi složité organizačně připravit. Kromě vlastní tvorby metodiky měření je nutné zajistit souhlas správce infrastruktury s nachystaným měřením. Podání žádosti o povolení měřit je nutné provádět alespoň s měsíčním předstihem. Při výběru termínu měření je nutné zohlednit očekávané meteorologické podmínky a ověřit nežádoucí výlukovou činnost na trati, příp. jiná provozní omezení. Zejména počasí je pak velmi komplikované takto dopředu odhadovat. V případě některých aktivních zkušebních úseků je navíc nutné sehnat souhlas výrobce či distributora s činností na zařízení. Vlastní měřické práce je nutné zaevidovat do systému cizích právních subjektů. To se provádí několik dní před měřickou činností u pověřeného zaměstnance příslušného úseku dráhy. Kontakty na tyto zaměstnance nejsou obecně nikde k dohledání. Při vlastním měření je nutné dodržovat bezpečnost práce. Všichni účastníci měření musí být řádně proškoleni, obeznámeni s metodikou měření a musí mít příslušná oprávnění ke vstupu na provozovanou dopravní cestu. Při střežení úseků s traťovou rychlostí nad $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ je nutné zajistit spolehlivé spojení s dopravním zaměstnancem, který je povinen měřické skupině sdělovat aktuální dopravní informace. Tato činnost byla velmi často zajišťována formou dohody o provedení práce s místně příslušnou správou tratí. Vlastní měřická činnost pak je ovlivněna povětrnostními podmínkami, dopravní situací a omezeními vyplývajícími ze špatně přístupných úseků provádění zkoušek. Jak by mělo takové měřicí stanoviště a obecně nově zakládaný zkušební úsek, optimálně vypadat je uvedeno v příloze F.

Je vhodné podotknout, že ze strany správce infrastruktury byl vždy vyvíjen dostatečně vstřícný postoj k plánování a organizaci měření. Někteří výrobci bohužel už tolik ochotní spolupracovat nejsou. Týká se to zejména poskytování souhlasu s měřením na aktivním zkušebním úseku provozního ověřování.

9.1 Studium dynamicko-akustických parametrů upevnění kolejnic

Z realizovaných měření lze vyvodit řadu významných a obecně platných skutečností. Ty prakticky potvrzují výsledky předchozích prací [49, 55, 56, 61, 106]. Nově byly navrženy

zásady výběru měřicího stanoviště a konkrétního měřicího profilu, včetně mezních kritérií přijetí. Pro měření in-situ byla použita velmi rozsáhlá modulární metodika měření. V rámci vyhodnocení byly využity inovativní matematické postupy, jakými jsou časově-frekvenční transformace, přenosové funkce akcelerační, apod. Zásadní vliv na charakter dynamických účinků vozidla na trať má technický stav vozidla a trati, nápravové zatížení, jízdní rychlost vozidla a místní podmínky na trati. Technický stav trati a vozidla se nejvíce projevuje v amplitudovém spektru pásma frekvencí nad 300 Hz. Naopak nápravové zatížení a jízdní rychlost je zásadním přispěvatelem k nárůstu dynamických účinků na nízkých frekvencích do 80 Hz. Zvyšující se rychlost má také za následek frekvenční posun významných kmítočtových oblastí. Mezi velikostmi hraničních frekvencí a jízdní rychlostí přitom platí přímá úměra. Čím více je vozová skladba vlaku rozmanitá a čím jsou vlaky delší, tím širší frekvenční spektrum zrychlení vibrací vybudí. S rostoucí vzdáleností místa měření od zdroje vibrací, tedy od pojížděné hrany kolo-kolejnice, se zužuje pásmo důležitých frekvencí. Těžiště frekvenčního pásma se zpravidla současně s tím posouvá k nižším frekvencím. Zároveň se snižuje i úroveň amplitudového spektra. Poměr snížení amplitudového spektra je nepřímě úměrný tuhosti. Čím je konstrukce tužší, tím menší je rozdíl mezi úrovní vibrací na kolejnici a na pražci, na pražci a v kolejovém loži, atd. Největších skoků v úrovni vibrací, zejména mezi kolejnicí a pražcem, je dosahováno u zpružněných typů upevnění.

Podívám-li se blíže na testované systémy upevnění, předem je vhodné konstatovat, že pro zkoušenou oblast použití jsou předmětné typy upevnění stabilní. Analýza pohybů naznačuje, že upevnění kolejnic na betonových podporách vykazuje díky své vyšší hmotnosti výhodnější setrvačné vlastnosti, než kolejový rošt s ocelovými pražci. Posuny kolejového roštu se v extrémních případech pohybují do 3 mm, přičemž nejvýraznější byly právě u upevnění S 15 na ocelových Y pražcích. Z výsledků je v některých případech viditelný ohyb pražce přes jeho středovou část. V oblouku vzniká v důsledku přenosu podélných sil na styk kolo – kolejnice mírné pootočení kolejového roštu vůči vertikální ose procházející těžištěm pražce. Dochází přitom k posouvání koncové části pražce a kolejnice na nepřevýšené straně oblouku v protisměru jízdy vlaku, zatímco na převýšené straně koleje má tento posun opačný charakter. Oba děje přitom probíhají současně. Pružnější typy upevnění umožňují vyšší posuny kolejnicového pásu. Na pražci však vycházejí z hlediska posunů srovnatelně, nebo dokonce výhodněji, než referenční tužší konstrukce.

Vibrodiagnostika ukázala, že čím je upevnění tužší, tím se oblast nejvýznamnějších kmítočtů přesouvá směrem k vyšším frekvencím. Platí, že zpružněná upevnění jsou problematická při použití na tratích s možným výskytem skluzových a dlouhých vln. Naopak upevnění s tužšími podložkami pod patu kolejnice jsou méně vhodná v oblastech s možným výskytem vlnovitosti. Je to způsobeno frekvenčními charakteristikami těchto upevnění. Upevnění S 15 vykazuje oproti ostatním typům upevnění odlišné vlastnosti. Průběh spektra zjištěného na Y pražci je velmi podobný průběhu spektra zjištěného na kolejnici. Nedochází tedy k výraznému útlumu vyšších frekvenčních složek, a tedy k výraznému posunu významných složek k nižším frekvencím, jak je tomu u ostatních typů zkoušených upevnění. Pružnější typy upevnění umožňují kolejnici více vibrovat. To má často za následek nárůst vibrací na frekvencích 400 ÷ 1500 Hz a s tím související riziko vyšších akustických účinků. Z pohledu dynamických parametrů jsou předmětem zájmu nejen vibrace kolejového roštu,

kteří mají vliv na kvalitu železničního svršku, ale také vibrace prostupující do širšího okolí trati. Rozvoj vibrací na hraně kolejového lože má různý průběh, zejména pak u konstrukce PJD, kde kolejové lože nahrazuje homogenní roznášecí vrstva HGT. Ta způsobuje, že klíčové frekvenční složky se z pásma nízkých kmitočtů přesouvají do oblasti 200 ÷ 650 Hz. Útlum vibrací směrem do širšího okolí trati je ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje však u všech testovaných typů upevnění srovnatelný.

U vlaků osobní přepravy se nejvyšší hodnoty akustického tlaku nacházejí na nejnižších středních frekvencích 16 Hz a 20 Hz. Naopak nejnižších hodnot je dosaženo na frekvencích 10 kHz a 12,5 kHz. V případě nákladních vlaků jsou nejvyšší hodnoty posunuty více ke středněfrekvenčnímu pásmu. Upevnění S 15 na ocelových pražcích tvaru Y nepředstavuje oproti počátečním předpokladům zvýšenou hlukovou zátěž. Provozní akustická měření prokázala, že ocelové Y pražce nejsou z hlediska akustických vlastností o nic horší, než porovnávané betonové pražce. Nejhluchnější ze všech typů upevnění byla konstrukce PJD RHEDA 2000 s upevněním Vossloh 300. Nárůst součtové hladiny akustického tlaku v nejvíce slyšitelném pásmu 500 Hz až 5,0 kHz činí na bližším stanovišti v průměru 5 dB a na vzdálenějším stanovišti v průměru dokonce 7 dB.

Výsledky vibrodiagnostiky z laboratoře se od výsledků in-situ mírně liší. Z výsledků v terénu je zřejmý posun výrazných středněfrekvenčních shluků o 100 ÷ 150 Hz směrem k počátku a snížení amplitudového spektra. Tento jev s největší pravděpodobností svázaný se spolupůsobením kolejnicového pásu bezстыkové koleje, jehož chování lze v reálné trati připodobnit k nekonečně dlouhému nosníku na diskrétních pružných podporách. Mírné odlišnosti na vyšších frekvencích pak zřejmě souvisí s obecně složitějšími vazbami kolejnice – pražec – kolejové lože in-situ, které nelze v laboratorních podmínkách plně simulovat. Přesto jsou laboratorní výsledky z analýzy dynamického chování upevnění kolejnic přínosné. Lze jimi v relativně krátkém čase a za menší finanční náklady získat staticky významné údaje. Rovněž je mnohem jednodušší využít laboratorní měření k řešení specifických úloh, jejichž realizace v provozované trati by byla výrazně omezena. Příkladem může být stanovení vlivu stárí podložky pod patu kolejnice na dynamické vlastnosti uzlu upevnění. Ten se projevuje zejména na frekvencích nad 500 Hz, kde je u starších podložek pozorován nárůst dynamických účinků.

Z analýzy také vyplynula zjištění, která nesouvisí přímo s konstrukcí železničního svršku, nýbrž s typem kolejového vozidla. Souprava řady 914+814 RegioNova dosahuje v měřicích úsecích nejvyšších hladin expozice průjezdu TEL, přestože jízdní rychlosti ani nápravové zatížení soupravy nejsou nejvyšší. Vlak je tak pro současné četné užívání na regionálních tratích v silně zastavěném území nevhodný. Nárůst hladiny TEL ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje vzhledem k ostatním měřeným vlakům srovnatelné rychlosti lze vyčíslit středními hodnotami 3 dB(A) až 5 dB(A), v extrémních případech až 7 dB(A). Motorový vůz řady 841 RegioSpider zase vykazuje ve frekvenčním spektru zrychlení vibrací velké amplitudy v ostře ohraničené oblasti kolem frekvence 520 Hz. Pravděpodobnou příčinou je rozptylové magnetické pole trakčního motoru. Při uvažované maximální rychlosti vozidla 120 km·h⁻¹ by tak v kombinaci extrémních podmínek

(frekventované požívání vozidla a maximální výkon trakčních motorů) mohlo docházet u tužších typů upevnění k rozvoji vlnkovitosti o vlnové délce cca 65 mm.

Typ upevnění	Předpokládaná oblast použití dle předpisu S 3 [14]	Omezení vyplývající z dynamicko-akustických parametrů upevnění ¹⁾
W 14	Průběžné traťové a hlavní staniční koleje na tratích v rozsahu směrnice GŘ SŽDC č. 16/2005 [105] (nový materiál); průběžné traťové a hlavní staniční koleje na ostatních tratích (nový, užitý nebo regenerovaný materiál); předjízdne koleje na vybraných tratích v rozsahu směrnice GŘ SŽDC č. 16/2005 [105] (nový, užitý nebo regenerovaný materiál); ostatní staniční koleje (nový, užitý nebo regenerovaný materiál);	Nezjištěno.
FC I	Průběžné traťové a hlavní staniční koleje na tratích v rozsahu směrnice GŘ SŽDC č. 16/2005 [105] (nový materiál); průběžné traťové a hlavní staniční koleje na ostatních tratích (užitý nebo regenerovaný materiál); předjízdne koleje na vybraných tratích v rozsahu směrnice GŘ SŽDC č. 16/2005 [105] (užitý nebo regenerovaný materiál)	V přímých úsecích koleje a v obloucích o velkém poloměru lze na tratích v RP 3 očekávat zvýšené riziko vlnkovitosti s délkou vlnek $70 \div 90$ mm (rezonanční pásmo blízké frekvenci 430 Hz); Vlnová délka se pro nižší RP bude lišit v závislosti na rychlosti; Vzhledem k chování kolejnicového pásu v oblasti kmitočtů do 200 Hz je upevnění FC I vhodné pro směrově složitě tratě s oblouky o menších poloměrech
KS	Průběžné traťové a hlavní staniční koleje na ostatních tratích (užitý nebo regenerovaný materiál); předjízdne koleje na vybraných tratích v rozsahu směrnice GŘ SŽDC č. 16/2005 [105] (užitý nebo regenerovaný materiál, nové pouze u tratí s výsledným přepočteným provozním zatížením menším než 29 mil. hrt/rok); staniční koleje v zarážkových oblastech a ostatní staniční koleje (nový, užitý nebo regenerovaný materiál);	Nezjištěno.

Pozn.: 1) hodnocení bylo provedeno pro soustavu UIC 60 a skladbu viz tab. 1-3;

Tab. 9-1 Rukověť pro použití jednotlivých typů upevnění; zdroj: autor

Typ upevnění	Předpokládaná oblast použití dle předpisu S 3 [14]	Omezení vyplývající z dynamicko-akustických parametrů upevnění ¹⁾
S 15	Průběžné traťové a hlavní staniční koleje na ostatních tratích (nový materiál); ostatní staniční koleje (nový materiál);	Nezjištěno.
W 14NT	Stejně jako u W 14, v koleji se směrovými oblouky o poloměrech menších, než 500 m, v koleji s nebezpečím zvýšeného bočního namáhání kolejového roštu s vysokým provozním zatížením	Nezjištěno.
E 14	Stejně jako u W 14, v kolejích, kde není možné zřídit kolejové lože dostatečné tloušťky; nesmí se vkládat do oblouků o menších poloměrech než 500 m	V obloucích do poloměru 700 m s velkým převýšením koleje hrozí při rychlostech do $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ zvýšený rozvoj skluzových vln, pravděpodobnost roste v úsecích před železničními zastávkami a stanicemi, kde vozidla často přibrzdí
W 21NT	Stejně jako u W 14, v koleji se směrovými oblouky o poloměrech menších, než 500 m, v koleji s nebezpečím zvýšeného bočního namáhání kolejového roštu s vysokým provozním zatížením	V obloucích do poloměru 700 m s velkým převýšením koleje hrozí při rychlostech do $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ zvýšený rozvoj skluzových vln, pravděpodobnost roste v úsecích před železničními zastávkami a stanicemi, kde vozidla často přibrzdí; V přímých úsecích koleje a v obloucích o velkém poloměru lze při rychlostech do $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ očekávat zvýšené riziko vlnkovitosti
300	Není definováno; v zahraničí obvykle vysokorychlostní tratě, na mostních objektech nebo v tunelech	V přímých úsecích koleje a v obloucích o velkém poloměru lze na tratích v RP 3 očekávat zvýšené riziko vlnkovitosti; Výrazné akustické emise, konstrukci je vhodné kombinovat s protihlukovými opatřeními, příp. se vyhnout zastavěnému území

Pozn.: 1) hodnocení bylo provedeno pro soustavu UIC 60 a skladbu viz tab. 1-3;

Tab. 9-1 Rukověť pro použití jednotlivých typů upevnění (pokračování); zdroj: autor

Typ upevnění	Předpokládaná oblast použití dle předpisu S 3 [14]	Omezení vyplývající z dynamicko-akustických parametrů upevnění ¹⁾
W 28NT ²⁾	Stejně jako u W 14, v koleji se směrovými oblouky o poloměrech menších, než 500 m, v koleji s nebezpečím zvýšeného bočního namáhání kolejového roštu s vysokým provozním zatížením	V přímých úsecích koleje a v obloucích o velkém poloměru lze na tratích v RP 3 očekávat prudký rozvoj vlnkovitosti s délkou vlnek 55 ÷ 75 mm (výrazné rezonanční pásmo blízké frekvenci 590 Hz)

Pozn.: 1) hodnocení bylo provedeno pro soustavu UIC 60 a skladbu viz tab. 1-3;

2) v sestavě upevnění použity úhlové vodící vložky Wfp 21 K NT-12

Tab. 9-1 Rukověť pro použití jednotlivých typů upevnění (pokračování); zdroj: autor

9.2 Metodika měření

Jednotná metodika měření je pro vývoj a analýzu železničních konstrukcí naprosto klíčová. Umožňuje získávat data v unifikovaném formátu, nezávisle na zhotoviteli měření. Na základě těchto dat je pak možné provádět analýzu různých typů konstrukcí, ověřovat vliv jejich případných modifikací, sledovat trendy chování v průběhu času, apod. Bez standardizované metodiky není možné získaná data uspokojivým způsobem svázat a vyhodnotit s výsledky jiných měření.

Použitá metodika měření popsaná v kapitole 4 prokázala spolu se zvoleným matematickým aparátem (kapitola 5) schopnost velmi dobře odhalit chování konstrukce na základě dynamicko-akustických parametrů. Sestává se ze tří základních modulů. První z nich umožňuje sledovat pohybové chování konstrukce. Druhý modul je zaměřen na vibrodiagnostiku. Zde existují různé modifikace v závislosti na tom, zda je měření prováděno laboratorně nebo v terénu. Poslední modul je uzpůsoben pro zjišťování akustických parametrů. V rámci metodiky bylo definováno uspořádání čidel, doporučené typy a parametry čidel a měřicí aparatury, včetně nastavení parametrů měření. Pro měření v laboratoři byly stanoveny rozměry a uspořádání zkušebních vzorků. Pro měření in-situ byla určena rozhodovací kritéria pro výběr měřicího úseku koleje, viz kapitola 6. Zvolená metodika poskytuje dostatečně přesné výsledky a je možné ji využívat opakovaně. Umožňuje univerzální použití pro různé konstrukce železničního svršku. Moduly se dají spolu libovolně kombinovat.

Metodika je určena třem skupinám uživatelů. Do první náleží vědecká a vzdělávací pracoviště zabývající se problematikou železničních konstrukcí. Výstupy z metodiky umožňují srovnání stávajících i nových konstrukcí železničního svršku. Poskytují důležité charakteristiky pro vývoj a srovnání nových progresivních řešení. Zároveň poskytují vstupy do matematických modelů, případně jejich kalibraci. Druhou skupinu potenciálních uživatelů představují vlastníci, resp. správci železniční infrastruktury v ČR i v zahraničí. Předmětná metodika poskytne údaje o dynamických parametrech jednotlivých řešení k sestavení expertní databáze. Třetím potenciálním uživatelem jsou výrobci a společnosti provádějící zakázková měření pro vývojová pracoviště a správce tratí. Těm poskytne detailní návod na realizaci

měření a jejich analýzu. Každé pracoviště, které použije navrženou metodiku, bude mít jistotu, že při jejím dodržení budou získané výsledky průkazné, opakovatelné a srovnatelné.

Aby byla výše popsaná komplexní metodika měření in-situ přiblížena co nejširšímu spektru potenciálních uživatelů, je žádoucí ji zjednodušit při zachování potřebné vypovídací hodnoty. Výsledky uvedené v kapitole 7 ukázaly, že z hlediska dynamicko-akustického chování kolejového roštu v oblouku je důležitá zejména vnější převýšená strana. Z toho důvodu doporučuji pro periodická měření v oblouku využívat pouze snímače v bodě 2 (tj. S4 až S7, A7 až A13, A19, A20, M2 a M3), na více kolejných tratích vždy ve vnější krajní koleji z důvodu požadavku na volné šíření hluku. Měření tak budou mít neustále stejnou konfiguraci a počet kanálů, bez ohledu na skutečnost, zda se jedná o měřicí úsek v přímé nebo ve směrovém oblouku.

Pro případ kontinuálního (stacionárního) měření doporučuji použít ještě úspornější metodiku založenou pouze na zeštíhleném modulu vibrodiagnostiky. Základem je použití čtyř snímačů. Na trhu totiž existuje velká řada malých ústředí, měřicích karet nebo jiných stavebnicově konfigurovaných zařízení, která jsou vybavena právě čtyřmi A/D kanály. Ze snímačů doporučuji vybrat tříosý snímač z paty kolejnice a jednoosý snímač z hlavy pražce, v případě oblouku na převýšené straně koleje. Zatímco na pražci je v drtivé většině případů dominantní svislý směr, na patě kolejnice to tak úplně neplatí. Zejména v úsecích v oblouku nabývají zásadního významu také podélné a příčné složky zrychlení vibrací. Snímače na kolejnici dokáží na základě časové a frekvenční analýzy předpovědět vznik kolejnicových vad v pojížděné ploše kolejnicového pásu, navíc je možné odhalit ploché kolo jedoucí soupravy. Celý systém je tak možné zapojit do systému centrálního dohledu diagnostiky závad jedoucích vozidel. Na základě kombinace dat z paty kolejnice a z hlavy pražce lze posoudit útlumové charakteristiky uzlu upevnění a sledovat jejich vývoj v čase.

9.3 Matematický aparát

Zvolený matematický aparát se při zpracování naměřených dat osvědčil. V časové oblasti vibrodiagnostiky a analýzy pohybového chování poskytnou lokální extrémy možnost indikovat umístění náprav vozidla i míru imperfekcí jednotlivých dvojkolí. Současně umožní získat informace o maximálních špičkových hodnotách zrychlení vibrací, tedy přeneseně o síle na kontaktu kolo – kolejnice. Velmi důležitou se jeví efektivní hodnota zrychlení vibrací RMS, která definuje energetický obsah měřeného signálu. Na jejím základě lze velmi jednoduše mezi sebou porovnávat jednotlivá měřená místa, stejně tak jako různé konstrukce. Jedním z nástrojů časové analýzy hluku je hladina expozice průjezdu TEL. Ta má přímou vazbu na ekvivalentní hladinu akustického tlaku. Pro zvýraznění vlivu hluku na lidský organismus je možné daný signál upravit filtrem A. Časová analýza je užitečným nástrojem diagnostiky, přesto neposkytuje informace o frekvenčním složení parametrů testované konstrukce. Z toho důvodu byly při zpracování dat využity postupy frekvenční analýzy. Ve vibrodiagnostice i v analýze hluku byla použita rychlá Fourierova transformace FFT. Ta se osvědčila pro svoji názornost a rychlost výpočtu. Hodnocenými veličinami bylo amplitudové spektrum zrychlení vibrací a vážené amplitudové spektrum akustického tlaku. V úlohách akustiky se navíc standardně používá třetinooktávová analýza hladiny akustického

tlaku, neboť umožňuje snadné srovnání v jednotlivých třetinooktávových pásmech. Pro vyjádření úrovně hluku ve vybraném frekvenčním intervalu jednočíslnou charakteristikou byl použit energetický součet třetinooktávových hladin akustického tlaku. V laboratorních úlohách byla stanovena přenosová funkce akcelerance. Z jejího průběhu lze snadno vymezit rezonanční pásma testovaných systémů upevnění kolejnic a stanovit útlumové charakteristiky významných špiček funkce akcelerance. Jako doplněk frekvenční analýzy zrychlení vibrací posloužila časově-frekvenční analýza ve formě 2D hustotních spektrogramů amplitudového spektra zrychlení vibrací získaných krátkodobou Fourierovou transformací STFT. Ta pomohla uspokojivě vysvětlit vznik a původ vysokých hodnot zrychlení vibrací ve vybraných frekvenčních oblastech amplitudového spektra. Tento poznatek bylo nutné zohlednit při vzájemném porovnávání jednotlivých konstrukcí upevnění. Přesnost a vhodnost metody STFT závisí na volbě okénkové funkce, její velikosti a na překrytí jednotlivých segmentů. Aplikace metody vyžaduje získání určité zkušenosti pro „rozumné“ definování vstupních parametrů, a také při interpretaci jejího spektra. Výstupy byly zobrazeny v lineární i decibelové (logaritmické) stupnici. Logaritmická stupnice zploští interval realizací, čímž vyzdvihne i méně významné složky. Naopak lineární měřítko je výhodnější pro názornou ukázkou nejdominantnějších oblastí a hodnot. Z nelineárních metod časově-frekvenční analýzy byla teoreticky popsána časově-frekvenční transformace z Cohenovy třídy, tzv. Rihaczekova transformace. Charakteristickým rysem prezentované transformace je skutečnost, že její výsledné rozlišení v čase a frekvenci není limitováno tzv. Heisenbergovým principem neurčitosti. Tato skutečnost zahrnuje vysokou rozlišovací schopnost v časově-frekvenční rovině, která se projevuje "přesnou" lokalizací význačných frekvenčních komponent v čase. Jistou nevýhodou této nelineární transformace je časová náročnost výpočtu a nároky na relativně velkou operační i diskovou paměť počítače. V současné době existuje také řada jiných, v praxi použitelných časově-frekvenčních transformací, které nepatří do Cohenovy třídy. Příkladem mohou být např. afinní a hyperbolické transformace. Jejich velkým problémem jsou zejména velké nároky na výpočetní výkon použité výpočetní techniky. Nicméně i tak jsou velkým příslibem pro další vývoj metod signálové analýzy.

Pro kontinuálně (stacionárně) měřená data doporučuji jejich automatizované zpracování. Bude-li zpracování nastaveno ve formátu souboru jednočíslných údajů, bude možné pro analýzu dat využít pokročilých metod umělé inteligence. Imperfekce oběžné plochy dvojkolí doporučuji hodnotit na základě časové analýzy. Jako hodnotící kritérium by mohl sloužit poměr mezi lokálním maximem a efektivní hodnotou zrychlení vibrací RMS, tzv. crest faktor, přičemž efektivní hodnota RMS by se počítala z celé délky vlaku. Výpočtem rychlé Fourierovy transformace FFT by bylo získáno amplitudové spektrum v rozsahu $100 \div 1000$ Hz, což je optimální rozsah pro rychlosti $100 \div 160$ km·h⁻¹. Výhodou této transformace je, že je založena pouze na změřených datech. Na základě amplitudového spektra by byl stanoven deskriptor určující kritérium pro diagnostiku pojižděné hrany kolejnicového pásu. Tímto deskriptorem může být energetický součet, hodnota amplitudového spektra průměrovaná počtem čar, příp. jiná popisná charakteristika signálové analýzy (statistický moment, atd.).

9.4 Návrh zařízení na měření dynamických účinků

Pro trvalou instalaci do tratě doporučuji čtyř kanálové měřicí zařízení. Jeho konfigurace by měla být taková, aby umožňovala vzhledem k frekvenčnímu rozsahu měření do 1,0 kHz vzorkování minimální frekvencí 2,5 kHz. Měřicí systém musí poskytnout 16 bitové, příp. 24 bitové rozlišení při snímání měřených veličin s napětovými nebo ICP vstupy a simultánní vzorkování. Dynamický rozsah vstupů musí být minimálně 80 dB. Systém musí být vybaven antialiasingovým filtrem pro každý kanál. Zařízení lze napájet dálkově z rozvaděče NN. Zařízení musí umožňovat zasilání naměřených dat na určený server do databázového systému, případně musí ukládat data, aby bylo možné provádět jejich fyzický sběr prostřednictvím SD karty nebo podobného média připojením k řídicí jednotce zařízení, viz kapitola 9.5.

Snímače zrychlení vibrací doporučuji typu ICP a TEDS s vestavěným zesilovačem s proudovým napájením 4 mA a s vestavěnou pamětí. Snímač na kolejnici doporučuji tříosý s citlivostí $1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ pro maximální zrychlení $5000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Snímač na pražci doporučuji jednoosý s citlivostí $10 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ pro maximální zrychlení $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Jako alternativu lze pro minimalizaci finančních nákladů zvolit kapacitní snímače MEMS. Cena za jednoosý snímač MEMS se v současnosti pohybuje řádově v tisícikorunách.

Z hlediska správné interpretace záznamu je vhodné měřit rychlost jízdy vozidla. Na trhu existuje celá řada zařízení, která je možné pro tyto účely použít. Praktická jsou zejména ta, díky nimž není nutné navyšovat počet A/D kanálů na měřicím zařízení, neboť jsou schopny využívat digitální vstupní kanály a hardwarová přerušení kontrolérů nebo měřicích karet. Do této kategorie patří různá PIR čidla, sériově zapojené infrabrány, ultrazvukové senzory apod. Pro účely měření rychlosti lze využít i odporové tenzometry nebo malé radarové zařízení s výstupem. Výhodou tenzometrů je, že umožňují současné měření kolové síly. Nevýhodou je pak to, že vyžadují poněkud složitější měřicí řetězec, který zahrnuje zapojení do můstku, zesilovač a filtry. Obě zařízení rovněž navyšují potřebný počet A/D kanálů.

9.5 Využití získaných dat

Data z měření je možné ukládat do databázového systému k dalšímu využití. Doporučuji výstupy v textovém souboru. Výstupy by měly mít jednotný formát pro snadnou orientaci, práci s daty a možnost automatizace postupů vyhodnocení. Datová struktura z měření uskutečněných v rámci méj dizertační práce je patrná na obr. 9-1. Obsaženy by měly být údaje o měření jako je datum, čas a povětrnostní podmínky, počet kanálů, vzorkovací frekvence, čas trvání záznamu, informace o vozidle aj. Vlastní měřená data obsahují v jednotlivých řádcích realizaci měřené veličiny v daném časovém kroku dle frekvence vzorkování. První sloupec reprezentuje čas, zbývající pak realizace v jednotlivých měřicích bodech. Sběr dat je možné provádět fyzicky z řídicí jednotky měřicího zařízení nebo lépe přímým odesláním v reálném čase na určený server centrálního databázového systému. Ne všechna data je potřeba ukládat. Výhodnější je data průběžně předzpracovávat a ukládat pouze vybrané informace. Do procesu ukládání dat mohou být zahrnuty algoritmy inteligentního třídění a zpracování.

```

Data info
File name: D:\Tomandl\namerena data\Popelin_KM_45.280 oblouk_Y_03_09_2009\13_R_2009_09_03_12_33_20.dsd
Start time: 3.9.2009 12:33:20.279
Number of channels: 26
Sample rate: 10000
Store type: vždy rychle
Global header information: from DEWESoft
Komentář: rychlost 73 km/h

Events
Event Type      Event      Time      Comment
1      ukládání spuštěno      0
2      ukládání ukončeno      65.5011

Data1
Time [s]      S4 [mm]      S5 [mm]      S6 [mm]      S7 [mm]      S10 [mm]      S0 [mm]
0      -0.032557357      -0.031327344      0.019232508      9.7205026E-5      -0.032829333      -0.019466581
0.0001      -0.032510981      -0.03137714      0.019118659      -2.7477174E-5      -0.032765094      -0.019470382
0.0002      -0.032176279      -0.031263102      0.019004811      -0.00011642728      -0.032850623      -0.019409562
0.0003      -0.032219041      -0.031462479      0.019086728      -0.00033005959      -0.033071477      -0.019463161
0.0004      -0.032105193      -0.031437583      0.019118659      -0.00042623215      -0.03313572      -0.019662729
0.0005      -0.032073073      -0.0317223      0.019189743      -0.00054730312      -0.033117853      -0.01952018
0.0006      -0.032001991      -0.0316974      0.019104404      -0.00071817095      -0.033075277      -0.019677173
0.0007      -0.031927105      -0.031747196      0.01921122      -0.00084988552      -0.033260401      -0.019737612
0.0008      -0.032147959      -0.031793572      0.019296559      -0.0008713628      -0.033406749      -0.019833786

```

Obr. 9-1 Příklad datové struktury; zdroj: autor

Vyhodnocená data poskytnou informace o stavu a kvalitě dráhy a kolejového vozidla. Je možné je kombinovat s údaji z MVŽSv a na jejich základě zoptimalizovat údržbové práce. Optimalizace údržby spočívá v predikci ideální doby údržbového zásahu (broušení kolejnicových pásu, podbíjení apod.). Je prokázáno, že včasná a pravidelná preventivní údržba je v konečném důsledku méně finančně nákladná, než zásadní opravy a rekonstrukce tratí [93, 107]. U systémů upevnění kolejnic je možné např. včasnou výměnou podložek pod patu kolejnice předejít zvýšeným dynamickým účinkům v oblastech nad 500 Hz a tím příznivě ovlivnit negativní vlivy způsobující rozvoj vlnkovitosti koleje apod. Dále je možné získaná data zakomponovat do systému centrálního dohledu diagnostiky závad jedoucích vozidel. Tím lze odhalit „vadná“ vozidla a po jejich provozovateli prokazatelně požadovat smluvní penále. Tímto preventivním opatřením je drážní infrastruktura chráněna před zvýšenými dynamickými účinky vyvolanými vozidly s poruchami jízdní plochy dvojkolí, neboť provozovatelé drážní dopravy budou nepřímo donuceni udržovat svá vozidla v dobrém technickém stavu. Uložená data mohou posloužit nejen pro účely státní správy, ale také pro projekci a vývoj a pro sledování vlivu na okolí. Pro jejich vyhodnocení je vhodné využít principů fuzzy logiky, neuronových sítí, genetických optimalizačních algoritmů, apod.

9.6 Doporučení

Na základě získaných zkušeností a ověření v praktických aplikacích doporučuji doplnit současný proces vývoje a výroby upevnění kolejnic o vibrodiagnostiku. Pro dané účely se velmi osvědčila metoda stanovení přenosových funkcí akcelerační systému upevnění vybuzeného rázovým kladivem, příp. jiným typem budiče, viz kapitola 4.1. Na jejím základě lze popsat silné a slabé stránky zkoušeného upevnění, predikovat možné chování v koleji a získat cenná data pro výpočtové modely. Metodika šetří čas a peníze výrobcům upevnění. Napomáhá v optimalizaci výrobku před samotným uvedením na trh, případně pomáhá odhalit různé děje spojené s provozem. V rámci provozního ověřování doporučuji doplnit postupy normy ČSN EN 13146-8 metodikou pro sledování dynamicko-akustických parametrů

upevnění pod jedoucím vozidlem. Dynamicko-akustické parametry umožňují popsat testovanou konstrukci v reálných podmínkách na trati a při reálném zatížení. Metodika je navržena v kapitole 4.2 a zjednodušena pro úseky v oblouku dle kapitoly 9.2. Metodika je sestavena ze třech na sobě nezávislých modulů – měření pohybů, vibrodiagnostice a měření hluku. Jednotlivé oblasti jsou v reálném prostředí železniční trati spolu úzce spjaty a navzájem se doplňují. Přesto je možné využívat jednotlivé moduly odděleně.

Pro kontinuální měření v rámci optimalizace údržby a doplnění systému diagnostiky jedoucích vozidel se doporučují věnovat návrhu a vývoji měřicího zařízení a systému centrální databáze. Daná problematika je předmětem kapitoly 9.2 až kapitoly 9.5. Systém má poskytnout cenné informace nejen pro správce dráhy, ale rovněž pro subjekty zabývajícími se návrhem, výrobou a výzkumnými činnostmi v oblasti železničních konstrukcí a staveb.

V rámci dalších prací v předmětné problematice se doporučují věnovat implementaci provozní metody stanovení stupně dynamického útluhu TDR na základě odsouhlaseného předpisu CEN/TR 16891. Pro daný typ měření bude nutné stanovit algoritmus pro přijetí úseku za účely experimentálních měření. Dále doporučuji doměřit konstrukci PJD s kolejovými absorbéry, aby bylo možné určit jejich účinnost při omezování hlukové zátěže. Pro studium vlivu a závislosti rychlosti na dynamických účincích na trať doporučuji využít infrastrukturu ZC Velim.

Při zřizování nových zkušebních úseků doporučuji se řídit zásadami uvedenými v příloze F. Dále doporučuji správci dráhy na základě získaných zkušeností smluvně ošetřit podmínky provozu ve zkušebních úsecích tak, aby bylo umožněno měření nezávislým subjektům bez nutného souhlasu výrobce testované konstrukce. Měření mohou, často prakticky zdarma, přinést správci dráhy, a tedy i potenciálnímu odběrateli ověřované konstrukce cenné informace z nezávislého sektoru.

Je vhodné podotknout, že další podrobnější doporučení týkající se problematiky měření dynamicko-akustických parametrů upevnění kolejnic jsou uvedena v kapitole 8.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Evropská komise. Bílá kniha. *Plán jednotného evropského dopravního prostoru – vytvoření konkurenceschopného dopravního systému účinně využívajícího zdroje*. Brusel. 28. březen 2011. 17 stran textu. 14 stran příloh.
- [2] CENIA, česká informační agentura životního prostředí. *Zpráva o životním prostředí České republiky 2014*. Ministerstvo životního prostředí Praha. 2015. 221 stran.
- [3] Vyhláška Ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb., *kteou se vydává stavební a technický řád drah*, ve znění pozdějších předpisů.
- [4] Česká technická norma ČSN 73 6360-2 vč. změny Z1. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba*. Říjen 2009.
- [5] Nařízení komise č. 1299/2014, *o technických specifikacích pro interoperabilitu, subsystém infrastruktura železničního systému v Evropské unii*. 18. listopad 2014. 6 stran textu. 103 stran příloh.
- [6] České technické normy řady ČSN EN 13481. *Železniční aplikace – Kolej – Požadavky na vlastnosti systémů upevnění*.
- [7] MORAVČÍK M., MORAVČÍK M.: *Mechanika železničních tratí*. EDIS Žilina. 695 stran. ISBN 80-7100-983-0.
- [8] ESVELD C.: *Modern Railway Track*, Second edition. MRT Production, Delf. 2001. 654 stran. ISBN 90-800324-3-3.
- [9] TIMOŠENKO, S. P. *Method of Analysis Statistical and Dynamical Stresses in Rails*. Second International Congress of Applied Mechanics. Curych. 1927. 14 stran.
- [10] FRÝBA, L. *Vibration of Solids and Structures under Moving Loads*. Third edition. Academia. Praha. 1999. 494 stran. ISBN 0-7277-2741-9.
- [11] PLÁŠEK O.: *Teoretická a experimentální analýza chování betonových pražců v kolejovém loži*. Zkrácená verze habilitační práce. Vutium. Brno. 2006. 37 stran.
- [12] STEFFENS D. M.: *Identification and Development of a Model of Railway Track Dynamic Behaviour*. Queensland University of Technology. Queensland. 2005. 238 stran textu. 79 stran příloh.
- [13] FASTENRATH F.: *Die Eisenbahnschiene, J. Eisenmann: Die Schiene als Träger und Fahrbahn*. Verlag W. Ernst. Berlín. 1977.
- [14] Předpis SŽDC S 3. *Železniční svršek*. Ve znění změny č. 1 a změny č. 2. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2008.
- [15] České technické normy řady ČSN EN 13146. *Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění*.
- [16] Předpis SŽDC S 4. *Železniční spodek*. Ve znění změny č. 1. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2008.
- [17] Zákon č. 22/1997 Sb., *o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů*, ve znění pozdějších předpisů. 24. leden 1997.
- [18] Nařízení vlády č. 163/2002 Sb., *kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky*, ve znění pozdějších předpisů. 6. březen 2002.

- [19] PLÁŠEK O., ZVĚŘINA P., SVOBODA R., MOCKOVČIAK M.: *Železniční stavby – železniční svršek a spodek*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno. 2004. 291 stran. ISBN 80-214-2621-7.
- [20] *Stručný přehled vývoje běžné koleje*. Internetové stránky Správy železniční dopravní cesty, státní organizace. <www.szdc.cz>.
- [21] WIETHOFF N.: *Nové trendy upevnění kolejnic*. 17. konference Železniční dopravní cesta 2012. Praha. 2012. 6 stran.
- [22] PANDROL TRACK SYSTEM. *Pandrol Vanguard Product Information*. Datasheet. <www.pandrol.com>.
- [23] ASMUSSEN B.: *State of the Art Review of Mitigation Measures on Track. Deliverable D.3.1*. RIVAS - Railway Induced Vibration Abatement Solution Collaborative Project. International Union of Railways UIC. 2011. 85 stran.
- [24] BEHR W.: *Design Guide and Technology Assessment of the Track Mitigation Measures. Deliverable D.3.13*. RIVAS - Railway Induced Vibration Abatement Solution Collaborative Project. International Union of Railways UIC. 2013. 50 stran.
- [25] KAEWUNRUEN S., REMENNIKOV A. M.: *State-dependent Properties of Rail Pads*. Transport Engineering in Australia. 2009. 8 stran.
- [26] KAEWUNRUEN S., REMENNIKOV A. M.: *Monitoring Structural Degradation of Rail Pads in Laboratory Using Impact Excitation Technique*. 1st International Conference on Structural Condition Assessment, Monitoring, and Improvement. Perth. 2005. 6 stran.
- [27] OTP č. j. 60 555/99-O13. *Obecné technické podmínky pro upevnění kolejnic*. České dráhy. Divize dopravní cesty. Leden 2000.
- [28] Česká technická norma ČSN EN 13146-8. *Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 8: Provozní ověřování*. Leden 2013.
- [29] Směrnice GR č. 28/2005. Č. j. 6 037/05-OP. *Koncepce používání jednotlivých tvarů kolejnic a typů upevnění v kolejích železničních drah ve vlastnictví České republiky*. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. Březen 2006.
- [30] ZVĚŘINA P.: *Provedení zkoušek příčného odporu ocelových prážců tvaru Y ve zkušebním traťovém úseku Liberec – Tanvald a jejich vyhodnocení*. Výzkumná zpráva. VUT v Brně. Říjen 2008. 77 str.
- [31] Předpis SŽDC S 9. *Pevná jízdní dráha*. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2012.
- [32] VOSSLOH FASTENING SYSTEMS. *Rail Fastening System for Concrete Sleepers System W 21*. Datasheet. <<http://www.vossloh-fastening-systems.com>>.
- [33] VOSSLOH FASTENING SYSTEMS. *Rail Fastening System for Slab Tracks System 300*. Datasheet. <<http://www.vossloh-fastening-systems.com>>.
- [34] VOSSLOH FASTENING SYSTEMS. *Rail Fastening System for Concrete Sleepers System W 28*. Datasheet. <<http://www.vossloh-fastening-systems.com>>.
- [35] Česká technická norma ČSN EN 13146-9+A1. *Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 9: Stanovení tuhosti*. Květen 2012.

- [36] Služební rukověť SŽDC SR 103/4. *Využívání měřicích vozů pro železniční svršek s kontinuálním měřením tratě pod zatížením*. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2010.
- [37] ZELENKA J., KOHOUT M.: *Možnosti ovlivnění jízdních a vodících vlastností kolejových vozidel parametry dopravní cesty*. Nová železniční technika 3/2010. KPM CONSULT, a.s. Brno. 2010. 5 stran. ISSN 1210-3942.
- [38] ŠKACH A. A KOLEKTIV: *Technická příručka traťového hospodářství ČSD*. Nakladatelství dopravy a spojů. Praha. 1971. 416 stran.
- [39] Česká technická norma ČSN 73 6360-1. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 1: Projektování*. Říjen 2008.
- [40] BREPTA R., PŮST L., TUREK F.: *Mechanické kmitání*. Nakladatelství Sobotáles. Praha. 1994. 592 stran. ISBN 80-901684-8-5.
- [41] NOVÝ R.: *Hluk a chvění*. Vydavatelství ČVUT. Praha. 2000. 389 stran. ISBN 80-01-02246-3.
- [42] HLAVÁČEK J.: *Protihluková a protivibrační opatření používaná v evropské železniční síti*. Vědeckotechnický sborník Českých drah: 6/1998. 5 stran. ISSN 1214-9047.
- [43] HLAVÁČEK J.: *Technické specifikace pro interoperabilitu subsystému „Hluk“*. Vědeckotechnický sborník Českých drah: 18/2004. 19 stran. ISSN 1214-9047.
- [44] LIEBERENZ, K., WEISEMANN U.: *Geokunststoffe in dynamische belasteten Erdbauwerken an Eisenbahnstrecken*. Rail International – Schienen der Welt. Prosinec 2002. 10 stran.
- [45] WETTSCHUREK R.: *Geräusche und Erschütterungen aus dem Schienenverkehr*. Zkrácená verze habilitační práce. Der Technischen Universität Berlin. 2005. 26 stran.
- [46] SMUTNÝ J., PAZDERA L.: *Snižování hluku u železničních vlakových souprav*. Akustika. Studio D – Akustika. České Budějovice. 2008. ISSN 1801-9064.
- [47] SCOSSA-ROMANO E., OERTLI J.: *Rail Dampers, Acoustic Rail Grinding, Low Height Noise Barriers*. A report on the state of the art. Schweizerische Bundesbahnen SBB. Bern. Říjen 2012.
- [48] SMUTNÝ J., TOMANDL V., VUKUŠIČ I.: *Snižování hluku od železniční dopravy aplikací kolových akustických absorbérů*. Environmentální aspekty dopravních staveb. Setkání kateder dopravních staveb 2010. Bořetice. 2010. 10 stran. ISBN 978-80-7204-696-6.
- [49] BEHR W.: *Design Guide and Technology Assessment of the Transmission Mitigation Measures. Deliverable D4.6*. RIVAS - Railway Induced Vibration Abatement Solution Collaborative Project. International Union of Railways UIC. 2013. 42 stran.
- [50] NEUBERGOVÁ K.: *Problematika hluku ze železniční dopravy*. Časopis stavebnictví 10/11. EXPO DATA spol. s r.o. Brno. 4 strany. ISSN 1802-2030.
- [51] VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. *Namáhání železničního svršku při $V = 200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$* . Závěrečná zpráva. Červen 2002.
- [52] KOTEK J.: *Měření a analýza dynamicko – akustických parametrů kolejnicových upevnění*. Diplomová práce. VUT v Brně. 2003.
- [53] TOMANDL V.: *Analýza dynamických parametrů kolejnicových upevnění*. Diplomová práce. VUT v Brně. 2007. 145 stran. 204 stran příloh.

- [54] INNOTRACK, Innovative Track Systems. International Union of Railways (UIC), Paris. 2010. ISBN 978-2-7461-1850-8.
- [55] RIVAS, Railway Induced Vibration Abatement Solution Collaborative Project. Seventh Framework Programme - project co-funded by the European Commission. International Union of Railways (UIC), Paris. 2013. <<http://www.rivas-project.eu/>>.
- [56] QCITY, Quiet City Transport. Sixth Framework Programme - project co-funded by the European Commission. 2005. <<http://www.qcity.org/>>.
- [57] SMUTNÝ, J.; PAZDERA, L.: FV_2009_1; *Měřicí kámen. Z253*, Ústav železničních konstrukcí a staveb, ftp://147.229.19.208/RIV/Funkcni_vzor. URL: ftp://147.229.19.208/Funkcni_vzor/FV_2009_1. (funkční vzorek)
- [58] LEYKAUF, G., L. MATTNER a L. STEINBEISSER. *Erprobung und Anwendung des Messverfahrens zur Ermittlung der Schotterschwingungen*. Messungen bei Burgsinn und Waghäusel. Im Rahmen der Schriftenreihe Mitteilungen des Prüfamtes für Verkehrswegebau der Technischen Universität München. Heft 71. 1997. ISSN 0341-5538.
- [59] SMUTNÝ J., TOMANDL V., VUKUŠIČ I., PAZDERA L.: *Vybrané metody modální analýzy uplatňované na železniční infrastrukturu*. Vědeckotechnický sborník Českých drah: 35/2013. 19 stran. ISSN 1214-9047.
- [60] EWINS D. J.: *Modal Testing – Theory, Practice and Application*. England: Research Studies Press Ltd. 2000. ISBN 0-86380-218-4.
- [61] PLÁŠEK O., SMUTNÝ J., SVOBODA R., HRUZÍKOVÁ M.: *Analýza tuhosti kolejové jízdní dráhy při dynamickém zatížení*. Nová železniční technika 6/2007. KPM CONSULT, a.s. Brno. 2007. 6 stran. ISSN 1210-3942.
- [62] SMUTNÝ, J.; TOMANDL, V.; VUKUŠIČ, I.: FV_2011_2; *Přípravek pro experimentální analýzu pohybového chování železničního roštu*. C161, Ústav železničních konstrukcí a staveb, ftp://147.229.19.208/RIV/Funkcni_vzor. URL: ftp://147.229.19.208/RIV/Funkcni_vzor/FV_2011_2. (funkční vzorek)
- [63] SMUTNÝ, J.; TOMANDL, V.; VUKUŠIČ, I.: FV_2011_3; *Měřicí kolík*. C161, Ústav železničních konstrukcí a staveb, ftp://147.229.19.208/RIV/Funkcni_vzor. URL: ftp://147.229.19.208/RIV/Funkcni_vzor/FV_2011_3. (funkční vzorek)
- [64] HLAVÁČEK J.: *Metodika měření a vyhodnocení vibrací od železničního provozu šířící se zemí*. CIDEAS. Dílčí výzkumná zpráva za rok 2007.
- [65] Česká technická norma ČSN EN ISO 3095. *Akustika – Železniční aplikace – Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly*. Březen 2014.
- [66] HLAVÁČEK J.: *Metodika pro měření akustických parametrů kolejových vozidel podle TSI, subsystém „Kolejová vozidla – hluk“*. Projekt MD ČR Databáze hlukových zdrojů na železnici. Technická zpráva ze dne 18. 12. 2006. 60 stran.
- [67] Předpis SŽDC S 3/2. *Bezстыková kolej*. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2013.
- [68] SMUTNÝ J., PAZDERA L.: *The experimental analysis of dynamic processes related to railway transport*. Akademické nakladatelství CERM. Brno. 2012. CD-ROM, 1st ed. ISBN 978-80-7204-827-4.

- [69] SMUTNÝ, J.: *Moderní metody analýzy hluku a vibrací aplikované na kolejovou dopravu*. Teze k doktorandské disertační práci. VUT v Brně. 1997. ISBN 80-214-0988-6. 37 stran.
- [70] VUKUŠIČ I.: *Analýza dynamických účinků ve výhybkách*. Dizertační práce. VUT v Brně. 2015. 157 stran. 280 stran příloh.
- [71] JANDOVÁ K.: *Prezentace - Vibrodiagnostika*. Laboratoř diagnostiky materiálů, detašované pracoviště Ústavu termomechaniky Akademie věd České republiky, v.v.i. 2006. <<http://www.cdm.cas.cz/czech/>>.
- [72] AUTORSKÝ KOLEKTIV BRÜEL & KJÆR: *Měření chvění*. Nové vydání, 1984. <<http://www.spectris.cz/sv/literatura.html>>.
- [73] Česká technická norma ČSN ISO 1996-1. *Akustika - Popis, měření a hodnocení hluku prostředí - Část 1: Základní veličiny a postupy pro hodnocení*. Srpen 2004.
- [74] Nařízení Komise (EU) č. 1304/2014, *o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému „kolejová vozidla - hluk“, kterou se mění rozhodnutí 2008/232/ES a zrušuje rozhodnutí 2011/229/EU*. 26. listopad 2014. 4 strany textu. 13 stran příloh.
- [75] BILOŠOVÁ A.: *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Modální zkoušky*. VŠB – Technická univerzita Ostrava. 2012.
- [76] MAN A. P. DE: *Dynatrack, A Survey of Dynamic Railway Track Properties and their Quality*. Disertační práce. TU Delft. DUP-Science. Delft. Prosinec 2002. ISBN 9-406-2355-9.
- [77] SMUTNÝ J., PAZDERA L.: *Využití Matlabu při analýze akusticko-vibračních vlastností upevnění kolejnic*. Sborník příspěvků 7. ročníku konference MATLAB '99. Praha. 3. 11. 1999. 9 stran. ISBN 80-7080-354-1.
- [78] COHEN L.: *Time-Frequency Analysis*. Prentice Hall PTR. Englewood Cliffs. New Jersey. 1995.
- [79] Směrnice SŽDC č. 67. Č. j. S 35410/11 – OTH. *Systém péče o kvalitu v oblasti traťového hospodářství*. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. Srpen 2011.
- [80] Předpis SŽDC Bp1. *Předpis o bezpečnosti a ochraně zdraví při práci*. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2013.
- [81] Předpis SŽDC S 2/3. *Organizace a provádění prohlídek a měření na železničních drahách celostátních a regionálních*. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2014.
- [82] Služební rukověť SŽDC SR 103/4(S). *Využívání měřicích vozů pro železniční svršek s kontinuálním měřením tratě pod zatížením*. Odbor traťového hospodářství (OTH). Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2010.
- [83] PLÁŠEK O.: *Výpočet pražce B91 S s pružnou ložnou plochou. Statická analýza metodou konečných prvků*. Výzkumná zpráva. VUT v Brně. Květen 2005. 26 str. textu. 47 str. příloh.
- [84] HUBÁČKOVÁ D.: *Výpočet ohybových momentů na příčných betonových pražcích pomocí metody konečných prvků*. Konference IX. International Scientific Conference FCE TUKE. Technická univerzita Košice. Košice. 2012. ISBN 978-80-553-0904-0.

- [85] Česká technická norma ČSN EN 15610. *Železniční aplikace – Emise hluku – Měření drsnosti povrchu kolejnic ve vztahu k hluku valení*. Prosinec 2009.
- [86] Česká technická norma ČSN EN 15461+A1. *Železniční aplikace – Emise hluku – Charakterizace dynamických vlastností úseků koleje pro měření hluku při průjezdech*. Červenec 2011.
- [87] EBERBASCH D., MÜLLER-BORUTTAU F. H.: *Dynamische Wegmessungen im Gleis – eine unverzichtbare Methode zur Auswahl neuer Oberbaukomponenten*. Eisenbahntechnische Rundschau. 1996. Roč. 45. Čís. 5. 10 stran. ISSN 0013-2845.
- [88] IŽVOLT L.: *Železničný spodok. Namáhanie, diagnostika, navrhovanie a realizácia konštrukčných vrstiev tělesa železničního spodku*. Žilinská univerzita. Žilina. 2008. 324 stran. ISBN 978-80-8070-802-3.
- [89] PUZAVAC L., POPOVIĆ Z., LAZAREVIĆ L.: *Influence of Track Stiffness on Track Behaviour Under Vertical Load*. Promet – Traffic & Transportation. 2012. Roč. 24. Čís. 5. 8 stran.
- [90] INNOTRACK GUIDELINE. *Method of track stiffness measurements*. Deliverable D2.1.11. Integrated Project No. TIP5-CT-2006-031415. 2010. 36 stran.
- [91] ARRAIGADA M., PARTL M.: *Calculation of Displacements of Measured Accelerations, Analysis of Two Accelerometers and Application in Road Engineering*. 6th Swiss Transport Research Conference. Monte Verità – Ascona. 15. – 17. března 2006. 31 stran.
- [92] TŮMA J.: *Numerical integration and differentiation of sampled time signals by using FFT*. Engineering mechanics. Svratka: UT Praha. 12. – 15. května 2003. 10 stran. ISBN 80-86246-18-3.
- [93] FUNKE H.: *Broušení kolejnic*. Agentura ELKA Press. Praha. 1992. 122 stran.
- [94] VYMĚTAL A.: *Měření svislých pohybů pražců Y ve šterkovém loži, úsek Popelín – Počátky, km 45,500*. Zpráva z měření. Komerční železniční výzkum KŽV s.r.o. Praha. 2005. 5 stran.
- [95] SMUTNÝ J., ZVĚŘINA P., SVOBODA R., HRUZÍKOVÁ M., VUKUŠIČ I.: *Měření dynamického chování kolejového roštu s ocelovými pražci tvaru Y*. Nová železniční technika 2/2010. 2010. 8 stran. ISSN 1210-3942.
- [96] SMUTNÝ J., TOMANDL V., VUKUŠIČ I.: *Dynamické vlastnosti kolejového roštu s Y pražci*. SILNICE ŽELEZNICE 3/2011. 6. ročník. KONSTRUKCE Media s.r.o. Ostrava. 8 stran. ISSN 1801-822X.
- [97] SMUTNÝ J., PAZDERA L., TOMANDL V., VUKUŠIČ, I.: *Acoustic Properties of Track Grid with Y- Shaped Steel Sleepers*. Akustika. Ročník 19. Číslo 1. Studio D – akustika s.r.o. České Budějovice. 2013. 11 stran. ISSN 1801- 9064.
- [98] SMUTNÝ J., TOMANDL V., PAZDERA L.: *Assessment of the Effectiveness of Low-Height Noise Brens Barrier*. Akustika. Ročník 23. Číslo 1. Studio D – akustika s.r.o. České Budějovice. 2013. 6 stran. ISSN 1801- 9064.
- [99] SMUTNÝ J., TOMANDL V., VUKUŠIČ I.: *Chování kolejového roštu při průjezdu vozidla obloukem*. Stavební obzor. Ročník 20. Číslo 2. Praha. 2011. 9 stran. ISSN 1210-4027.

- [100] Předběžná česká technická norma ČSN P ENV 13005. *Pokyn pro vyjádření nejistoty měření*. Listopad 2005.
- [101] ZUTH D.: *Analýza nejistot ve vibrodiagnostice*. Dizertační práce. VUT v Brně. 2009. 95 stran.
- [102] Česká technická norma ČSN ISO 10846-1. *Akustika a vibrace – Laboratorní měření vibroakustických přenosových vlastností pružných prvků - Část 1: Principy a směrnice*. Leden 2009.
- [103] Metodický návod HEM-300-11.12.01-34065, *pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí*. Ministerstvo zdravotnictví. Praha. Prosinec 2001.
- [104] Česká technická norma ČSN ISO 1996-2. *Akustika - Popis, měření a posuzování hluku prostředí - Část 2: Určování hladin hluku prostředí*. Srpen 2009.
- [105] Směrnice GR č. 16/2005. Č. j. 3790/05-OP. *Zásady modernizace a optimalizace vybrané železniční sítě České republiky*. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. Leden 2006.
- [106] SMUTNÝ J., PAZDERA L.: *The experimental analysis of dynamic processes related to railway transport*. Akademické nakladatelství CERM. Brno. 2012. ISBN 978-80-7204-827-4.
- [107] MAINLINE, Maintenance, Renewal and Improvement of Rail Transport Infrastructure to Reduce Economic and Environmental Impacts. European Union's Seventh Framework Programme for research, technological development and demonstration under grant agreement no. 285121. International Union of Railways (UIC), Paris. 2014. <[http:// http://www.mainline-project.eu/](http://www.mainline-project.eu/)>.

Seznam použitých zkratek a symbolů

$|H(f)|$	.....	faktor zisku
$|Z_M|$	.....	dynamická tuhost upevnění
$2D$	.....	dvozměrný (two-dimensional)
$3D$	.....	trojrozměrný (three-dimensional)
A	.....	amplituda
a	.....	zrychlení (vibrací)
$a(t)$	.....	okamžitá hodnota zrychlení vibrací
$A(x)$	.....	odezva ve vzdálenosti x
A/D	.....	analogicko-digitální
a_b	.....	svislé zrychlení vibrující nápravy
a_c	.....	svislé zrychlení odpružené hmoty
a_{ef}	.....	efektivní hodnota zrychlení vibrací (častěji užívána jako RMS)
AEIF	.....	Evropská asociace pro interoperabilitu na železnici
A_i	.....	konstanta
A_i	.....	součinitel citlivosti
A_x	.....	funkce pro výpočet nelineárních časově-frekvenčních transformací
b	.....	konstanta
c	.....	tlumení
$C(X)$	.....	crest faktor
c_1	.....	rychlost šíření dilatační vlny v neomezeném třírozměrném prostředí
c_2	.....	rychlost šíření ekvivolumetrické vlny
CEN	.....	Evropský výbor pro normalizaci (European Committee for Standardization)
CMS	.....	měřicí systém MVŽSv (Congration Measuremet Systém)
c_R	.....	rychlost šíření Rayleighovy vlny
CT_x	.....	časově-frekvenční transformace z Cohenovy třídy
CZK	.....	celková známka kvality
ČSN	.....	česká technická norma
D	.....	projektované převýšení koleje
d	.....	průměr
D	.....	útlum chvění
$D2$	.....	pásmo vlnových délek D2
D_{eq}	.....	teoretické převýšení koleje
df	.....	kmitočtová šíře

dF	přírůstek síly
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
dy	přírůstek deformace
e	délka ramene
E	modul přetvárnosti
E	přebytek převýšení
$E(X)$	střední (absolutní) hodnota
EC	kategorie vlaku Euro City
EN	evropská norma
EPDM	mikropórovitý etylen-propylen
EVA	etyl-vinyl-acetát
Ex	kategorie vlaku Express
f_{Nyq}	Nyquistova frekvence
f	frekvence
F	interakční síla
F	svislá složka zatížení
$F(t)$	označení diferenciální rovnice soustavy SDOF
f_c	střední frekvence
FFT	rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform)
f_k	frekvence kmitavého pohybu
f_n	netlumená vlastní frekvence
FRF	frekvenční odezвовá funkce (Frequency Response Function)
FT	Fourierova transformace (Fourier Transform)
$FTA(t)$	celková síla působící v daném okamžiku na trať
f_{vz}	vzorkovací frekvence
G	Laméova konstanta
g	tíhové zrychlení
GPk	geometrické parametry koleje
GPS	Globální polohovací systém (Global Positioning System)
GŘ SŽDC	generální ředitelství Správy železniční dopravní cesty, státní organizace
GSM-R	mezinárodní standard bezdrátové komunikace pro železnici
H	rámová síla
$H(f)$	funkce frekvenční odezvy
$h(\tau)$	jednotkový impuls
HGT	homogenní roznášecí vrstva

I	intenzita zvuku
i	i -tý člen proměnné
I	nedostatek převýšení
I_0	referenční hodnota intenzity zvuku
IC	kategorie vlaku Inter City
ICP	snímač s vnitřním integrovaným obvodem (Integrated Circuit Piezoelectric)
ISO.....	mezinárodní organizace (International Organization for Standardization)
I_x	moment setrvačnosti k ose x
j	imaginární jednotka
k	koeficient rozšíření
K	konstanta útlumu
k	parametr závislý na rychlosti
K	počet segmentů signálu při výpočtu Welchovou metodou
k	statická tuhost (pérová konstanta, pružnost)
K	systém upevnění
k_1	složka tuhosti
k_2	složka tuhosti
K_A	korekce váhového filtru A
k_H	Hertzova kontaktní tuhost
K_{odr}	koeficient odrazivosti okolních ploch
k_z	spojitá svislá tuhost kolejové jízdní dráhy
l	délka
L	délka směrového oblouku
L	délka úseku kolejového roštu
L_{aef}	hladina zrychlení vibrací
L_I	hladina intenzity zvuku
L_K	délka sinusové vlny
L_p	délka přechodnice kubické paraboly
L_p	hladina akustického tlaku
$L_{pAeq,T}$	ekvivalentní trvalá vážená hladina akustického tlaku
$L_{pAeq,Tp}$	ekvivalentní trvalá vážená hladina akustického tlaku za dobu průjezdu
L_r	hladina akustické drsnosti
L_w	hladina akustického výkonu
m	hmotnost
m	konstanta

M	počet vzorků jednoho segmentu signálu při výpočtu Welchovou metodou
M_0	vibrační hmota
M_1	celková hmotnost
MD	měřicí drezína
MDOF	soustava s více stupni volnosti (Multi Degree of Freedom)
MEMS	kapacitní snímač (Micro Electro Mechanical Systems)
MH	měřicí hladina
MMD	malá měřicí drezína
MOs	kategorie vlaku motorový osobní vlak
MVTV	měřicí vůz trakčního vedení
MVŽSv	měřicí vůz pro železniční svršek
n	počet vzorků
n	strmost vzestupnice
N	celkový počet vzorků signálu při výpočtu Welchovou metodou
N	nákladní vlak
NN	nízké napětí
Os	kategorie vlaku osobní vlak
OTP	obecné technické podmínky
p	akustický tlak
P	akustický výkon
P	řídící síla
p_0	referenční hodnota akustického tlaku
P_0	referenční hodnota akustického výkonu
Pd	Prud'hommeovo kritérium
PE	polyetylén
PJD	pevná jízdní dráha
PK	převýšení koleje
Q	kolová síla
q	parametr závislý na rychlosti
q_1	průvodič ke středu otáčení
$Q_{max,lim}$	dynamická kolová síla
R	kategorie vlaku rychlík
R	poloměr oblouku koleje
r	poloměr železničního kola
r	vodorovná délka nejvzdálenějšího mikrofonu

$r(x)$	akustická drsnost kolejnice
$\hat{r}(\lambda)$	spektrum akustické drsnosti
r_0	referenční hodnota drsnosti
R^2	úroveň spolehlivosti
RK.....	rozchod koleje
R_M	reálná část impedance
RMS.....	efektivní hodnota zrychlení vibrací (Root Mean Square)
RP	rychlostní pásmo
R_r	reálná část impedance
r_{RMS}	efektivní hodnota drsnosti
R_w	poloměr kola
s	vektor posuvu
S	výsledný odhad spektrální hustoty při výpočtu Welchovou metodou
s	vzdálenost rovin styčných kružnic
$s(\bar{x})$	směrodatná odchylka aritmetického průměru
SC	kategorie vlaku Super City
SD	paměťová karta (Secure Digital)
SDO	směrodatná odchylka
SDOF.....	soustava s jedním stupněm volnosti (Single Degree of Freedom)
SEL	hladina jednorázové expozice hluku
SIM	účastnická identifikační karta (Subscriber Identity Module)
S_j	dílčí periodogram spektrální hustoty při výpočtu Welchovou metodou
SK.....	směr kolej
SL	směr levého kolejnicového pásu
SP.....	směr pravého kolejnicového pásu
STFT.....	krátkodobá Fourierova transformace (Short Time Fourier Transform)
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty, státní organizace
t	čas
T	čas
t	součinitel
T_a	třecí síla
TDR	stupeň dynamického útlumu trati (Track Decay Rate)
TEDS	elektronický katalogový list (Transducer Electronic Data Sheet)
TEL	hladina expozice průjezdu
TMS	traťový měřicí systém (Track Measuring System)

TNO/PBA.....	metoda určená ke stanovení TDR (Pass-by-Analysis)
TR.....	technická zpráva (Technical Report)
TÚDC.....	Technická ústředna dopravní cesty
U	norma vektoru okénkové funkce u Welchovy metody
U	rozšířená nejistota měření
u	složka vektoru posuvu
$u(x_{i,j})$	kovariance nejistoty mezi korelovanými veličinami x_i a x_j
$u_A(x)$	standardní nejistota veličiny x vyhodnocená postupem A
$u_B(x)$	standardní nejistota veličiny x vyhodnocená postupem B
$u_C(y)$	kombinovaná nejistota
UIC.....	International Union of Railways
ÚŽKS.....	Ústav železničních konstrukcí a staveb
V	návrhová rychlost
v	rychlost (vibrací)
V	rychlost jízdy vlaku
v	složka vektoru posuvu
v	výška nad temenem kolejnice
VK.....	podélná výška koleje
VL.....	podélná výška levého kolejnicového pásu
VP.....	podélná výška pravého kolejnicového pásu
VUT.....	Vysoké učení technické
w	okénková funkce u Welchovy metody
w	složka vektoru posuvu
w	svislé posunutí
w	váhový faktor
$W(f)$	odezva soustavy ve frekvenční oblasti
$w(t)$	funkce odezvy na jednotkový impuls
w_0	statická hodnota průhybu pod působící silou
w_{ref}	šířka referenčního povrchu
x	měřicí vzdálenost
X	vstupní veličina
$X(f)$	reprezentace signálu ve frekvenční oblasti
$x(t)$	reprezentace signálu v časové oblasti
x_i	odchylka geometrické hodnocené veličiny
X_M	imaginární část impedance

Y	vodící síla
y	výchylka
y	výchylka vibrací
Y	výstupní veličina
y_o	maximální příčná odchylka dvojkolí vzhledem k ose koleje
z	hloubka působení Rayleighovy vlny pod povrchem
z	svislý posun
ZC	zkušební centrum
ZK	zborcení koleje
ZKS.....	syntetické zborcení koleje
ZKV	známky kvality definovaných parametrů
Z_M	komplexní mechanická impedance
ZP	známka podbíjení
ZR	změna rozchodu koleje pro stanovenou délku koleje
α	poměr ke kritické rychlosti
α	úhel náběhu okolku vůči kolejnici
β	poměr ke kritickému tlumení
β	konstanta doznívání
β	poměrný útlum
γ	úkos jízdní plochy
Δ	kubická dilatace
Δ	stupeň dynamického útlumu
η_d	relativní průhyb
θ	frekvenční posunutí
λ	Laméova konstanta
λ	vlnová délka
μ	součinitel adheze
ν	Poissonovo číslo
ζ_l	úhel průvodka ke středu otáčení vůči ose podvozku
ζ_d	bezrozměrná veličina
ζ_d	relativní průhyb
π	fázový předstih
π	Ludolfovo číslo
ρ	hustota prostředí
ΣY	součet příčných sil

τ	.....časové posunutí
φ	.....rotační úhel
φ	.....vliv rychlosti jízdy
$\Phi(f)$	.....fázový posun
$\psi(\theta, \tau)$	.....jádrová funkce nelineární časově-frekvenční transformace
ω	.....úhlová rychlost
ω_x	.....x-ová složka rotace
ω_y	.....y-ová složka rotace
ω_z	.....z-ová složka rotace

Seznam příloh

Příloha A	Měření v laboratoři
Příloha B	Měření u Bílovic nad Svitavou
Příloha C	Měření u Počátek-Žirovnice Měření u Popelína Měření u Kamenného Malíkova
Příloha D	Měření u Hranic na Moravě Měření u Napajedel
Příloha E	Měření u Třebovic v Čechách
Příloha F	Zásady pro zakládání a vyhodnocování zkušebních úseků

